<平成22年度助成>

食品の微細加工に着目した食感のバイオメカニクス

1. 緒 言

「食文化」という言葉が示すように、人間が食物 を摂取するという行為には、単に栄養物を体内に 取り込むという以上の意味がある。すなわち、「食 べる」という行為を通して人間が生きていること を実感する喜びである。特に、高齢者にとっては 食べる楽しみが生き甲斐に直結しており、若年層 以上に「食べる」ことの重要性が高い。また、近 年、咀嚼は脳機能との関連性も指摘されており¹⁾、 「食べる」ことが人々の QOL に多面的に貢献する との考えが広まりつつある。

食品のあじわい(食味)は、味、形状、色、香り、 食感などの複合感覚であるが、中でも食感は食味 の重要なファクターである。食品には種々の食感 があるが、なかでもパリパリ感、サクサク感のある 加工食品は食感が商品価値を決定づけるほど重要な 意味をもつ。食感は食品栄養学の範疇であるが機械 工学およびバイオメカニクスの観点から考察するこ とで新たな発見と展望が開けると考えている。

食感は多方面から研究されているものの²⁾³⁾、 主観的評価に頼っている場合が多く、食感のメカ ニズムの解明は十分とは言えない。そこで、本研 究では食感を客観的に評価する手法の確立を目指 している。本稿では、食品の微細構造に着目して、 構造力学的側面から食感に関する研究を実施した ことを報告する。

2. 方 法

本研究では、食感に影響を及ぼす食品の内部構

伊能教夫

(東京工業大学大学院理工学研究科)

造に着目した。具体的には微細構造を有する加工 食品(煎餅、ビスケットなどのスナック菓子)を 研究対象として、加工食品の微細構造と食品の機 械的特性との関係を調べた。

研究方法を図1のフローチャートに示す。左側 は、微細構造を有する加工食品を工業用X線CT 装置で撮影し、その断層画像から加工食品の構造 的特徴を画像分析する手順である。一方、右側は X線CT撮影で用いた加工食品に荷重試験を施し て荷重履歴を計測し、機械的特性を調べる手順で ある。そして両者を比較・考察することにより、 加工食品の微細構造と機械的特性の関係を明らか にすることを目指す。なお、本研究では微小な荷 重と変位を計測可能な試験機を開発している。後 述するように、食品の微細構造の機械的特性は、 この試験機で計測した荷重履歴から求められる。



3. X線 CT 撮影による食品の構造分析

図2は、主原料は同じ(じゃがいも)であるが、 食感に明確な違いのあるスナック菓子の断層画像 である。二つの食品の微細構造は明らかに異なっ ている。つまり、食品の微細構造は食感に大きく 寄与している可能性が高い。そこで、食品の断面 画像から構造の特徴を示すと考えられる特徴量を 抽出し、これを用いて食品の特性を表現すること を試みた。また、それらの特徴量を主成分分析し、 分類法としての有効性を調べた。対象とする加工 食品は、市販の細長い棒状のスナック菓子8種類 である。





スナック菓子 A

スナック菓子 B X 線 CT 断層像

図 2 スナック菓子の断面構造

X線CT 画像は、円柱状のスナック菓子の長手 方向に沿った断面を撮影したもので、1 画素の大 きさおよび隣り合う断層画像間のピッチは 18μm である。図3は実際の断層画像であり、暗部が空 気、白色部がスナック菓子の生地を示している。 撮影にはマイクロX線CT装置 (ScanXmate-A130SS940)を用いた。



図3 特微量抽出のための CT 画像

特徴量抽出に際して注目したのは、図4に示す ような特定の注目領域における生地の割合であ る。今回は、この値を便宜的に占有面積と定義し、 式(1)~(4)に示す4つの特徴量を調べた。すな わち、Size:スナック菓子の代表寸法、Average: 直径方向の平均占有面積、Variance:直径方向に分



布する占有面積の標準偏差、Moment:表面近傍 への占有面積の偏りである。

$$Size = T \cdot N$$
 (1)

$$Average = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} D_i$$
(2)

Variance =
$$\left\{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N} (D_i - A)^2\right\}$$
 (3)

$$Moment = \sum_{i=1}^{N} \left[D_i \left\{ \left(n_i - \frac{N}{2} \right) / \frac{N}{2} \right\} \right]$$
(4)

ここで、T:断層画像間のピッチ(mm)、N:占
 有面積を算出できる断層画像の全枚数、Di:表面
 から直径方向に数えてi番目の画像の占有面積、
 n_i:i番目までの画像の枚数、A:注目領域の面積(mm²)である。また、注目領域の大きさを示す
 W、Lはどちらも2mmとして算出した。

これらの特徴量で主成分分析した結果を図5に 示す。第一主成分の寄与率は0.457、第二主成分 の寄与率は0.372で、第二主成分までの累積寄与 率は0.829であった。このことから、図5の散布 図は元の特徴量が有していた情報をよく表して いると考えられる。各主成分の意味について考 えると、第一主成分はMomentとAverageが同程 度寄与している量で、Varianceも先の2種類に比 べて弱いながらも影響を与えていると言える。一 方、第二主成分はSizeとほぼ平行であり、これか ら最も大きな影響を受けている。また、Average、 Varianceは第二主成分に対して正の相関があるの に対し、Momentは負の相関があるということが



わかる。

各試料の位置関係を見ると、第一に、試料A が第二主成分に関して他の試料より明らかに小さ いことがわかる。これは第二主成分に大きな影響 を与えているSizeが試料Aと他とで大きく異なっ ていたことを意味する。第二に、試料B、試料D、 試料Gの一部がAverage、Varianceにおいて大き な値を有していたことが見てとれる。また、試料B、 試料GはAverage及びVarianceのベクトルに沿っ て分布しており、Momentに対してはごく狭い範囲 に集中している。これに対して、試料Dは個体差 が少なく、構造の均質な試料であったことがわかる。 ただし、この分析法のみでは構造と機械的特性 の関係は明らかではない。そこで両者を関連づけ るための実験計測を行うことにした。

4. 加工食品の局所的物性の測定

幾何学的な内部構造を機械的特性と関連づける には、荷重履歴を調べる必要がある。従来から食 品の荷重履歴は重要と認識されており、ヤング率 や破壊強度などの物性を計測する研究は数多く報 告されている^{4)~7)}。しかし、その多くはマクロ 的な挙動を調査することを目的としており、微細 構造との関係を調べた研究は食品関係では、ほと んどない。

図6は、通常のテクスチャーアナライザ(小型 卓上試験機)を用いて、上述した8種類のスナッ ク菓子の荷重履歴を測定した結果の一例である。 ここで得られるマクロ的な荷重履歴の変動に着目 して、varianceに相当する構造的特徴との相関を 調べてみたところ、これらの間に明確な相関を見 出すことは難しいという結論を得ている⁸⁾。ただ し、荷重の細かな変動については、食品の局所的 な破壊によるものであり、食感に重要な特徴と考 えられる。その理由は、これらの変動は全体の荷 重履歴と比較すれば微小であるが、人体の歯根膜 に内在する機械的受容器はこの変動を知覚するだ



図6 通常の荷重試験機によるスナック菓子の荷重履歴

けの感度を有しているからである⁹⁾。つまり、微 小な変動は多彩な食感の重要なファクターとなっ ている可能性が高く、バイオメカニクス的観点か ら局所的な機械的特性も把握しておく必要がある と考えられる。このことから本研究では、スナッ ク菓子の微小領域の機械的特性、特にヤング率を 計測することに重点を置いた。

4.1 微小荷重試験機の開発

微細構造の機械的特性を測定するには、局所的 な箇所の荷重履歴を計測する装置が必要になる。 本研究では、1辺が100μm 程度の対象領域の機 械的特性を取得することを目指しているため、こ の測定には、mN オーダの荷重とμm オーダの変



図7 微小荷重試験機の構成



図8 本研究で開発した微小荷重試験機

位の計測を要する。そこで本研究では、このオー ダの荷重と変位を計測可能な試験機を新たに開発 した。図7および図8に、開発した微小荷重試験 機の構成と組立後の全体像を示す。また、表1に 本計測装置の仕様を示す。荷重を加える圧子の位 置制御は1ステップ8.3*nm*で動作するピエゾア クチュエータ(PI 社製 P-625 1CL)で行っている。 荷重履歴は、荷重分解能100 μN の高感度ロード セル(A&D 製 LC-4001)を用いて測定している。 また、変位計測には繰り返し精度0.913 μm のレー ザー変位計(KEYENCE 社製 LK-H027K)を用 いた。

表1 微小荷重試験機の仕様

最大試験ストローク(µm)	500
最大試験速度(µm/s)	1.4
最小動作量(nm)	8.3
定格荷重(N)	1.18
荷重分解能(µN)	100
変位分解能(μm)	0.913

図9に試験片を載せた圧子部を示す。圧子部が スナック菓子と接触する位置は、二つのビデオカ メラで観察して確認している。これは、有限要素解 析において荷重点の位置の決定として重要である。

測定データは 0.1 kHz でサンプリングし、デー タロガーに記録している。測定結果の一例を図 10 に示す。図では 10 分の 1 にデータを間引いてい るが、スナック菓子の生地に圧子が接触してから



図9 試験機の圧子部



線形的に荷重が増加していることがわかる。後述 するようにこの増加関係を利用して局所的なヤン グ率を算出する。

4.2 機械的特性の推定手法

対象物の微小領域のヤング率を測定するために、 筆者らは以下に示す算出手法を提案している¹⁰⁾。

- Step 1. スナック菓子から 10mm³ 程度の小片で 試験片を作る。このとき試験片が食品内 のどこに位置していたかを記録しておく。 対象としたスナック菓子の小領域を図 11 に、小領域を取り出して作成した試験片 の一例を図 12 に示す。
- Step 2. 試験片の工業用マイクロX線CT画像を 撮影する。本実験では画像解像度を26µm と設定し、512×512ピクセルの画像で撮 影した。
- Step 3. 撮影した X 線 CT 画像から有限要素モデ ルを作成する。モデリングにあたっては、 CT 画像からスナック菓子の生地の存在 領域を 2 値化処理した画像データを使用 する。有限要素は、1 辺 26 µm の立方体 ボクセルで表現する。
- Step 4. X 線 CT 撮影した試験片に対して、微小 荷重試験を行い、荷重履歴を計測する。
- Step 5. 試験片の有限要素モデルに荷重試験と同 等の境界条件を与えて、計算機上で変位 量を求める。



図11 スナック菓子の試験片



図12 スナック菓子の試験片

試験片から作成した解析モデルと応力解析の 結果を図13に示す。有限要素モデルは、要素数 約57万要素、節点数約70万である。有限要素解 析は、本学に設置してあるスーパーコンピュー タTSUBAME2.0で行った。解析ソフトウェアは MD-NASTRAN2010を使用した。

ヤング率の推定方法を以下に示す。試験片は小 領域区間では均質で物体の変形過程は線形である と仮定すると、変形∆*d*とヤング率*E*の関係は次 式で表される。

 $E \Delta d = Const. \tag{5}$

さらに、右辺の定数は試験片の形状情報と境界 条件によって定まるため、有限要素解析の結果と 荷重試験の結果では共通の定数をもつことにな り、次式が成立する。

$$Ea \ \Delta \ da = Ec \ \Delta \ dc \tag{6}$$

ここで E_a は有限要素モデルに対して仮定した ヤング率である。つまり、解析の段階では有限要 素モデルに適当なヤング率を設定して応力解析を 行う。この解析によって得られる変位量が Δd_a である。また、 Δd_c は圧縮試験における試験片の 変位である。具体的には図 10 の赤線で示した傾 きから決定される。 E_c は、求めるべき試験片の ヤング率である。結局、式(6)の中で未知数は E_c のみであるため、試験片のヤング率を推定できる。

本手法では、X線CTで計測可能な大きさの幾 何学的構造であれば、たとえ不定形で複雑な構造 であっても有限要素モデルに反映されるため、従 来のマクロ的な計測方法に比べて詳細な物性デー タを得ることができる。

また、図13の応力分布をみると応力発生箇所 は数十μmの領域に限定されている。つまり、こ の領域で歪みが発生しており、これが荷重試験機 の変位量となっていると考えられるので、この領 域のヤング率を算出していることになる。このこ とから試験片の大きさに依らずに、圧子の場所を 変えることにより数十μmの領域のヤング率を求 めることができる可能性がある。



図13 有限要素モデルと応力解析結果の一例

4.3 ヤング率算出値

上述した方法によって得られたヤング率を表 2に示す。算出されたヤング率は、100MPaから

表2 CT 値とヤング率の関係

試験片番号	荷重点の位置	ヤング率(MPa)
No.1	内部の生地	178
No.2	表面の生地	613
No.3	内部の生地	257

600MPa 程度の値となっている。通常の荷重試験 機を使用した図6のような荷重履歴のデータから ヤング率を算出した場合は、2MPa 程度となる(ス ナック菓子の直径8mm、圧子の直径5mmと設 定して算出)。つまり、マクロ的な機械特性とは 非常に異なる値になっており、微小領域の機械的 特性を調べる意義があると考えている。

また今回の測定実験では、試験片はまだ3個の みであるが、値に大きな違いがあることがわかる。 試験片 No.2 は、外側付近の計測で算出された ヤング率であり、内側の領域で計測された No.1, No.3 のヤング率と比べると高い値になっている。 これは、スナック菓子の製造工程で生地の加熱に より、外側と内側で物性の違いが出ているためで はないかと考えられる。このように熱処理による 生地の物性変化も調べられる可能性がある。

今後、計測点を増やした実験を行うとともに、 食感の異なるスナック菓子を対象として詳細に機 械的特性を調べていきたい。

5. 結 論

本報告では、食感を生み出す重要なファクター と考えられる食品内部の微細構造に着目し、局所 的な機械的特性を測定する実験装置を開発した。 そして、有限要素解析と組み合わせることで数十 µm スケールの領域のヤング率が算出可能である ことを示した。微細構造の機械的特性に関する研 究は、端緒についた段階であり、今後、種々の条 件で実験計測を行っていく必要がある。この研究 を進めることにより、多彩な食感を生み出す微細 構造と機械的特性の関係が総合的に議論できるよ うになると考えている。

謝 辞

本研究を遂行する上で、多大な研究助成金を賜 りました浦上食品・食文化振興財団に心より感謝 の意を表します。

文 献

- 1)成田紀之:咀嚼と前頭前野,日本咀嚼学会雑誌, Vol.18-1, pp.12-21 (2008)
- 2) 西成勝好, 大越ひろ, 神山かおる, 山本隆: "食感ハンドブ ック", サイエンスフォーラム (2005)
- David Kilcast: "Texture in food Volume 2: Solid foods", Woodhead Publishing Ltd. (2004)
- Szczesniak, A. S., Brandt, M. A. and Friedman, H.: Development of standard rating scales for mechanical parameters of texture and correlation between the objective and sensory methods of texture evaluation, *Journal of Food Science*, Vol.28, pp.397-403 (1963)

- Vincent, J. F. V.: Application of fracture mechanics to the texture of food, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 11, pp. 695-704 (2005)
- 6)和田淑子:焼き菓子のテクスチャーと物性に関する研究,日本家政学会誌, Vol.50-9, pp.903-914 (1999)
- 7) 中野典子, 森奥登志江: クレープ生地の物性と官能特性に及 ぼすそば粉の影響, 調理科学, Vol.23-2, pp.174-179 (1990)
- 門脇廉,小関道彦,木村仁,伊能教夫:食感のバイオメ カニクス(加工食品の内部構造に関係する破砕時の荷 重履歴の特徴量),M&M2009材料力学カンファレンス, CDROM, PS13 (2009)
- Manley, R. S., Pfaffman, C., Lathrop, D. D. and Keyser, J.: Oral sensory thresholds of persons with natural and artificial dentitions, *Journal of Dental Research*, Vol.31, pp.305-312 (1952)
- 10) Ren Kadowaki, Hitoshi Kimura, Norio Inou: Mechanical Property of Crispy Foods Focusing on the Microstructue, The 6th International Conference on Micro Manufacturing ICOMM/2011, pp.685-690 (2011)

Biomechanical study of food texture based on micro-structure of crispy foods

Norio INOU

Department of Mechanical and Control Engineering Tokyo Institute of Technology

This study deals with examining characteristic mechanical properties of crispy foods. Crispy foods have a variety of inner structures and consequently have non-uniform mechanical properties in the foods. These characteristics may be closely related to food textures, but there are few reports on the theme.

To examine the characteristics of non-uniformity of the foods, we examined structural patterns on cross-section of crispy snacks with principal component analysis. Eight kinds of commercially available crispy snacks were scanned by an industrial X-ray CT. The cross sectional images for the each subject were evaluated by the four characteristics: scale of the subject, existence rate of food material for specified area of the object, variance of food material for a specified space of the object, and deviation of food material. The principal component analysis showed that these four characteristics were useful indications to classify the crispy snacks from stand point of structural pattern. However, the mechanical properties of the snacks are not cleared from this analysis.

For examination of mechanical properties of the crispy snacks, we developed a compression testing machine on the micro-scale level and proposed a new estimation method of Young's modulus of crispy foods. The machine obtains a load-deflection curve compressing a specified point of a test piece with 10⁻³ Newton order loading force and 10⁻⁶ Meter order displacement.

Using the compression testing machine, we estimated Young's modulus as the following procedures. First, a small test piece was made from a snack and the cross-sectional CT images were obtained. At the same time, a compression test with the test piece was performed and the load-deflection curve was obtained. Second, the individual finite element model was made based on the CT images. Third, stress analysis was performed. Since Young's modulus of food material of the snack on the micro scale level is unknown, a temporary Young's modulus E_a was given to all finite elements. The boundary condition of the model was set as to be equivalent of the compression test. From the analytical result of deformation Δd_a , we can finally estimate Young's modulus E_c by the equation $E_a \Delta d_a = E_c \Delta d_c$ because we know Δd_c from the experimental data on the compression test.

The estimated values of Young's modulus showed 100-600 MPa on micro-scale level whereas 2 MPa was estimated from a common compression test on the macro-scale level. It is cleared that there is much difference in Young's modulus between micro- and macro- scale level. The proposed estimation method of mechanical property will be useful for developing new crispy foods.