

非線形粘弾性による食感評価法の検討

武田 理香, 津留崎 恭一 (化学技術部 材料化学グループ)

1. はじめに

近年、嗜好の多様化や介護食としての需要が高まり、様々な食感の食品開発が行われている。更に 3D プリントによるフードプリント技術が向上し、噛み心地やのど越しなどヒトによる官能評価と材料強度との関係について盛んに研究がされている。一方で、官能評価は個人によるばらつきがあり、加えて官能評価と物性値が一致しないことがしばしば問題となっている。

噛み心地やのど越しといった食感を模擬した物性試験法として動的粘弾性測定 (DMA) が広く用いられている。しかしながら、食品に対して正弦的に大きな変形を加える動作で生じる非線形粘弾性 (NLVE) 特性を考慮することが不可欠であるにもかかわらず、従来の研究では微小変形を前提とした線形粘弾性 (LVE) の物性値で評価してきた。そしてこのことが、官能評価と物性値の間に乖離が生じる大きな要因と考えられる。

そこで本研究では、我々が考案した NLVE 領域での評価法 (NLVE 指標 κ) を用い、大変形を与えたときのグミの挙動を解析し、ヒトが感じる食感を定量化することを試みた。

2. 解析方法

正弦波歪、歪速度、応力 (ϵ , $\dot{\epsilon}$, σ) の 3 次元リサーチ曲線 (図 1 参照) の形状を、微分幾何学の知見を用いて考察した。規格化した粘弾性測定点 $r=(\epsilon(t), \dot{\epsilon}(t), \sigma(t))=(\sin\omega t, \cos\omega t, \alpha(t))$ の軌跡の曲率 κ は次式で定義される¹⁻³⁾。

$$\kappa = \sqrt{\omega^2 + \frac{\dot{\sigma}^2}{\omega^2 + \dot{\sigma}^2} \left(\frac{\omega}{\omega^2 + \dot{\sigma}^2} \right)^2} \quad (1)$$

(ω : 角周波数)

ここで、 σ の上にあるドットは時間微分を意味する。(1) は、NLVE の有無に関わらず成り立つ。

3. 実験方法

試料は、噛み心地の異なる 3 種類の市販グミと、ペクチン量を変えて作成した 3 種類の自作グミとした。これらの試料を $7 \times 7 \times 4$ mm に切断し、測定を行った。表 1、表 2 に各種グミの組成及び弾性率を示す。

DMA (TA インストルメント社製 RSA-G2) による NLVE 測定は、治具上部に 3 点曲げ用圧子、下部に 15 mm ϕ の平行プレートを用い、試料に縦方向の ϵ を与えて σ を観測した。 ϵ が 1 周する間に σ を等しい時間間隔で 1024 点測定した。最大歪 (ϵ_0) は 50 %、振動

数は 1 Hz、測定環境は全て室温とした。

4. 結果

図 2 に市販グミについて NLVE 指標 κ の 1 周期変化を示す。横軸である時刻について、0 s から 0.25 s は歪が圧縮方向にかかり始め、最大に到達するまでの時間である。さらに 0.25 s から 0.50 s は治具が元の位置に戻るまでの時間、0.50 s から 1.0 s は引張方向に治具を引き上げ元の位置に戻る時間となる。この一連の正弦波運動は、ヒトの歯が食べ物に触れてから噛みしめ、下顎を下げて歯から食べ物を剥がし、咀嚼を続ける動作に相当する。

表 1 市販グミの組成及び弾性率

	グミ A	グミ B	グミ C
タンパク質 (%)	6	11	10
添加物	ペクチン		アラビアガム
E'	72kPa	129kPa	185kPa
E''	40kPa	37kPa	108kPa
$\tan \delta$	0.55	0.29	0.58

(タンパク質(%), 添加物は製品パッケージに記載された値を記載)

表 2 自作グミの組成及び弾性率

	ペクチン 0%	ペクチン 1%	ペクチン 5%
ゼラチン (%)	10	10	10
ペクチン (%)	0	1	5
E'	23kPa	22kPa	26kPa
E''	0.6kPa	2.0kPa	2.9kPa
$\tan \delta$	0.03	0.09	0.11

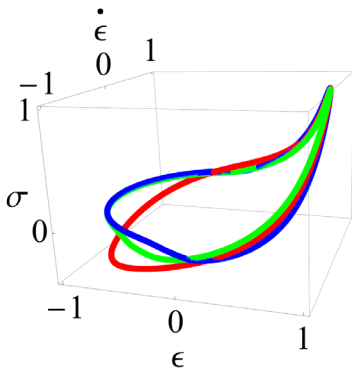
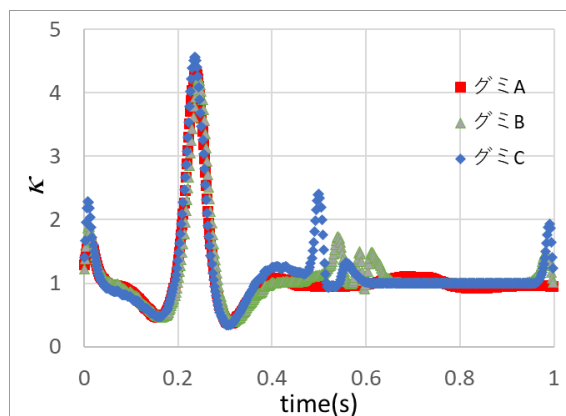
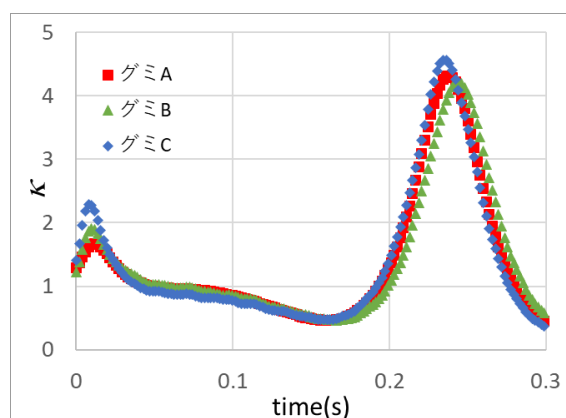
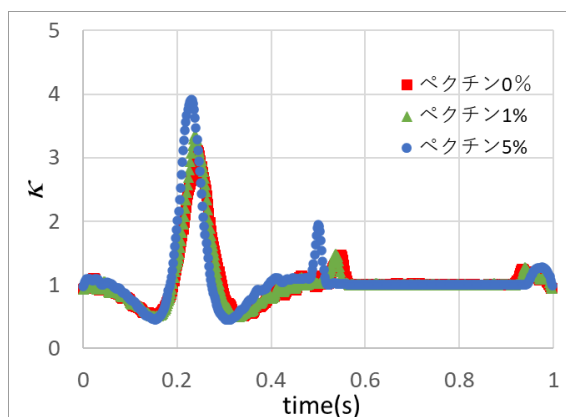


図 1 3次元リサーチ曲線 (赤: グミ A, 緑: グミ B, 青: グミ C)

図2 市販グミにおける κ の1周期変化図3 市販グミにおける κ の1周期変化 (0-0.3 s に拡大)図4 ペクチン配合自作グミにおける κ の1周期変化

咀嚼に相当する動きの中で κ に様々なピークがみられる。時間ごとの動きを詳細にみるため、図2を0sから0.3sまでに拡大したグラフを図3に示す。測定開始直後の κ のピーク高さはLVEで得られた弾性率 (E') の順で高くなっている。これは噛み始めたときに感じる硬さの違いを表していると考えられる。0.25s付近にみられるピーク時間は試料によってズレがある。 $\tan\delta$ が大きいグミCは0.22sあたりでピークを迎え、 $\tan\delta$ が小さいグミBは最も遅い。このことから、粘弾性特性の違いを反映していると考えられる。ピーク高さについては単純に E' の順に並んではない。0.25s付近にみられるピークは大きく変形させたときの挙動であることから、硬さや

エネルギー吸収以外にも複雑で多様な要因があると思われるが、今回の結果からは明らかではない。

治具が元の位置から引き上げ方向に変わる0.5s以降のピーク時間にもズレがみられる(図2)。グミCは治具が引張方向に引き上げ始める直後の0.5sにピークが見られ、グミBは少し引きあがったときにピークをとった。一方でグミAではピークがみられなかった。このことからピーク位置によって付着度合いが判断できると考えられる。また、治具に付着したグミが少しずつ剥がれていく場合はピークが複数現れる。

ペクチン配合量を変えた自作グミの結果を図4に示す。自作グミでも同様に、測定開始直後の κ のピーク高さは E' の順となった。0.25s付近にみられるピーク時間も $\tan\delta$ の大きい順に早く、ピーク高さは E' の順と一致した。自作グミではゼラチンとペクチンのみの単純な組成であるため E' の順になったとも考えられるが、ピーク高さについては今後の検討課題である。0.5s以降では、ペクチン5%グミは直ぐにピークが現れ、次いでペクチン1%、ペクチン0%の順であった。また、ピーク数も1つであった。測定前に試食したところ、ペクチン配合量が多い程硬くポロポロと崩れて付着性がないような食感であった。これらの結果は、実際の食感と一致した。

5. まとめと今後の展開

我々の考案したNLVE指標 κ によって簡便に食感評価ができるかを検討した。

噛み心地の異なるグミを対象にこれまでに開発した非線形粘弾性指標 κ を用いて食感と数値化したデータとの関係を探った。ヒトが噛み始めるときに感じる硬さの違いや、噛みしめたときに感じる粘弾性の感触の違い、歯に付着する様子を κ の周期変化によって捉えることが出来た。さらに、増粘剤(ペクチン)により食感を変えたグミを作成し、配合量による変化を κ で読み取ることが出来ることを確認した。ペクチン量を変えると硬さや粘着性が変化することをヒトに感覚と近い結果として得ることが出来た。

NLVEを用いることで、食品の持つ本来の複雑な動的挙動を新たな指標として捉えることが可能となる。この手法は、食品開発における高品質化や消費者満足度向上に貢献する可能性が高い。また、他のソフトマテリアル分野への波及効果も期待できる。

今後簡便に解析可能なアプリを作成し、さらに様々な食材のNLVEデータベースを構築することで、食品の食感評価へと繋げる。

【参考文献】

1. 武田, 津留崎, KISTEC 研究報告, 67 (2020).
2. 武田, 鈴木, 津留崎, KISTEC 研究報告, 51 (2021).
3. 武田, 津留崎, KISTEC 研究報告, 36 (2023).

【外部発表】 口頭発表 2件