
ヒトの摂食メカニズムを考慮した力学測定およびヒト生理計測による 食品テクスチャーの評価と加工食品の製品デザイン

三栄源エフ・エフ・アイ株式会社 ○船見孝博、中馬誠、石原清香
農研機構食品研究部門 神山かおる
大阪歯科大学 小野 高裕
新潟大学 堀 一浩
湖北工業大学 西成 勝好

1. はじめに

食品のおいしさを決定する二大要因はフレーバー（味と香り）およびテクスチャー（食感）である¹⁾。そのうちテクスチャーは食品のおいしさの約30%を占めるといわれており、主食に限ればその割合はさらに高いと言われている²⁾。さらに超高齢社会の日本においては、摂食機能に配慮した加工食品への需要が高まり、開発におけるテクスチャーの重要性は増している。本講演では、ヒトの摂食メカニズムを考慮した食品の力学測定およびヒト生理計測による食品テクスチャーの評価、さらにそれらの評価法を用いた加工食品の製品デザインに関する我々研究グループの一連の研究成果について報告する。

2. 舌での押し潰しの機械的再現によるテクスチャー評価

やわらかい食品では歯で噛むことなく舌で潰すことにより食塊を形成するが、通常の「かたい」冶具を用いる機器測定ではヒトの摂食過程における舌の変形が考慮されておらず、その結果が必ずしも食品のテクスチャーを反映していない可能性がある。我々の研究では、ヒトの舌と硬口蓋での押し潰しを機械的に再現する目的で、ソフトマテリアルからなる人工舌と一軸圧縮試験機を組み合わせた *in vitro* 評価系を検討した^{3), 4)}。食品モデルとして寒天ゲルを用い、舌を模擬したシリコンゴムと硬口蓋を模擬した金属プローブ間で寒天ゲルを10 mm/sで圧縮変形させたところ³⁾、圧縮による寒天ゲルの変形が人工舌の変形よりも大きい場合、寒天ゲルは破断した。一方、寒天ゲルの変形が人工舌の変形と同等以下の場合、寒天ゲルは破断しなかった。みかけ弾性率が 5.5×10^4 Pa程度の人工舌を用いたときに、人工舌上で寒天ゲルが破断するかどうか、ヒトの口腔内での摂食様式（歯で噛むか舌で潰すか）と対応した。ただし、食品モデルとしてゼランガムを用いた検討から、破断歪が60%以上の変形性の高いゲルでは変形速度を10 mm/sから5 mm/sへ低下、あるいは人工舌のみかけ弾性率を 1.1×10^5 Paに増加させることで両者の対応が向上することが示された⁴⁾。またこれら2つの研究により、ヒトは比較的小さい歪領域（約10%）で舌に対する食品の相対的な変形の違いを知覚し、摂食様式を決定する可能性が示唆された。

3. 伸長粘度およびトライボロジー測定によるテクスチャー評価

粘弾性流体はせん断変形と伸長変形で異なる流動特性を示す場合がある。伸長変形（流動）は摂食や嚥下などの食品の口腔内プロセスでも起こることから、伸長粘度とテクスチャーには何らかの関係性があるものと推察される。50 s⁻¹において同等のせん断粘度を有するキサントガム（XG）とローカストビーンガム（LBG）の水溶液を比較したところ、低伸長歪領域ではXG水溶液はLBG水溶液よりも、高伸長歪領域ではLBG水溶液はXG水溶液よりもそれぞれ伸長粘度が大きかった⁵⁾。XG分子は分子内静電反発により伸長した剛直なコンフォメーションをとるため歪硬化が起こりにくいが、LBG分子は静電反発のない柔軟でランダムなコイルコンフォメーションをとるため歪硬化が起こりやすいと考えられる。テクスチャーとの関係では比較的低歪域における伸長粘度が感覚的なまとまり感、比較的高歪域における伸長粘度が感覚的な曳糸性とそれぞれ高い正の相関を示した⁶⁾。

濃厚感、なめらかさ、すべり感などの感覚特性や易嚥下性の判断は食塊の表面特性によるところが大きいと考えられるため、人の摂食・嚥下過程で起こりうる食品-生体組織間の摩擦や潤滑と関連するトライボロジーが重要となる。上記と同じXG水溶液とLBG水溶液を比較したところ、ほとんどのすべり速度領域においてLBG水溶液はXG水溶液よりも摩擦係数が大きく⁵⁾、この理由はLBGが膜を形成しにくく、冶具の基材同士を接着させやすいためと考えられる。また、テクスチャーとの関係では、境界潤滑領域

および混合潤滑領域の臨界点における摩擦係数は感覚的なべたつき感と高い正の相関を示した⁶⁾。

4. 生理計測によるテクスチャーの評価

摂食過程で生体器官から発せられるシグナルはヒトの感覚と関係し、テクスチャーの動的な変化を表す可能性がある。我々は、ヒトの硬口蓋に貼りつけることができる薄型の感圧センサーやヒトが筋肉を動かすときに発生する電気信号を測定する筋電位測定を用いて摂食・嚥下挙動を解析した。様々な力学特性のゲル状食品を用い、摂食・嚥下時における舌の動きを詳細に調べたところ⁷⁾、押し潰し時の舌圧はゲルのかたさ（破断応力）よりも脆さ（破断歪）の影響を強く受けること、嚥下中の舌圧の大きさはゲルのかたさが増加するにつれて増加するが、舌圧の持続時間には影響がないことなどを見出した⁸⁾。

さらに我々は、増粘剤溶液のレオロジー特性と嚥下音解析から得られる特性値の関係を調べた。喉頭蓋の位置に固定した振動センサーとそれに接続したリニアレコーダーによって嚥下音を録音し、音響解析装置を用いて嚥下音波形を解析した⁹⁾。様々なせん断粘度のXG水溶液とLBG水溶液を嚥下させたときの嚥下音プロファイルは3つのセクション（音の塊）に分けられ、時系列にそれぞれ喉頭蓋の閉鎖音 t_1 、食塊の咽頭相通過音 t_2 、喉頭蓋の開口音 t_3 に帰属された。さらに t_2 を水の咽頭相通過音の継続時間である T_2 で規格化したところ、XG水溶液は粘度の増加に従って t_2/T_2 が低下するが、LBG水溶液は粘度によらず t_2/T_2 がほぼ一定だった。嚥下音解析で得られた t_2/T_2 とまとまり感の感覚強度には負の相関が認められ、食塊の咽頭相通過音の継続時間が短い試料は嚥下時のまとまり感が高い傾向がみられた。

5. 食品開発への応用事例

日本の超高齢社会では嚥下・咀嚼困難者が増加しており、摂食機能が低下した人にも食べやすい、飲み込みやすい食が求められている。我々はこれまで、水分・栄養補給目的のゼリー状食品、半固形状および胃内増粘タイプの濃厚流動食、ミキサー食用の固形化補助剤、そして誤嚥リスク低減のためのとろみ調整食品などの製品開発に上記のテクスチャーの数値化技術を応用してきた。本講演では、おいしさと食べやすさを両立する新規な惣菜およびデザートゼリーを紹介する¹⁰⁾。

6. おわりに

テクスチャーは食のおいしさを決定する重要因子であり、近年の超高齢社会においては摂食の安全という観点でも重要性が増している。基礎研究で得られた研究成果を応用展開し、消費者のQuality of Lifeの向上に貢献する加工食品に資する技術的ソリューションの開発に精進したい。

参考文献

- 1) 神山かおる, 食感創造ハンドブック, サイエンスフォーラム, pp. 185-191 (2005).
- 2) 西成勝好, 化学と生物, 34, 197-204 (1996).
- 3) Ishihara et al., *J. Texture Stud.*, 44, 104-114 (2013).
- 4) Ishihara et al., *J. Texture Stud.*, 45, 354-366 (2014).
- 5) Funami & Nakauma, *J. Texture Stud.*, 52, 567-577 (2021).
- 6) Funami & Nakauma, *J. Texture Stud.*, 53, 60-71 (2022).
- 7) Hori et al., *Food Hydrocolloids*, 44, 145-155 (2015).
- 8) Murakami et al., *J. Texture Stud.*, 52, 303-313 (2021).
- 9) Nakauma et al., *Food Hydrocolloids*, 25, 1165-1173 (2011).
- 10) 船見孝博, 機能性糖質素材の開発と食品への応用II, シーエムシー出版, pp. 100-107 (2013).

【講演者の紹介】

氏名（ふりがな）：船見孝博（ふなみたかひろ）

略歴：三栄源エフ・エフ・アイ株式会社 現職 取締役執行役員 事業本部長 学術博士

受賞歴：日本食品科学工学会 奨励賞（2010）および論文賞（2022）受賞

Food Science and Technology Research 論文賞（2015）受賞