

咀嚼圧力分布解析に基づく高齢者向けゲル状食品の食感評価システム

Texture Evaluation System of Gel Foods for Elderly People Based on Pressure Distribution Analysis

2161016



研究代表者 大阪大学大学院工学研究科 准教授 東 森 充
共同研究者 大阪大学大学院工学研究科 博士後期課程 柴 田 暁 秀

【研究の目的】

高齢者向けの介護用食品として、舌と口蓋を使って押しつぶすこと（以下、舌式咀嚼と呼ぶ）が可能な水分および栄養補給用のゲル食品が開発されている。このような介護食用ゲル食品においては、咀嚼・嚥下の安全性と美味しさが高次元で両立することが望まれる。美味しさは、食品の化学的性質＝味や香りのみでなく、物理的性質＝食感にも強く依存する。介護食の研究・開発現場において、食感の客観的かつ定量的な評価データの獲得が切望される一方で、ヒトによる官能試験では、時間、コスト、信頼性の問題が重大な懸案事項となっている。従来、機器を用いた物理測定によって食感を評価する研究が行われているが、剛体プローブや剛体プレートを用いて食品の圧縮・破断操作を行っている。しかしながら、実際のヒトの舌は柔軟性を有し、食品を咀嚼する際、柔軟物同士の力学および幾何学的な相互作用を通じて圧縮・破断操作が行われている。このため、剛体で構成される機器測定環境と柔軟な舌を用いるヒトの口腔内環境とでは、食品の破断状態が大きく異なる恐れがある。

以上の背景の下、本研究では、ヒトの舌の弾性を考慮した食感評価手法を構築することを目的とする。舌式咀嚼可能なゲル食品を対象とし、

弾性可変型模擬舌を導入した新しい食感評価システムにより食感の推定精度向上を図る。

【研究の内容、成果】

①食感評価システムの全容

【官能評価値の事前準備】 図1(a)に示すように、教師データとして、素材の異なる複数種類のモデリング用ゲル食品の官能評価値を準備する。官能評価値 n は、実際にヒトが試食する官能試験により取得する。

【人工咀嚼モデルを用いた圧力分布計測】 図1(b)下段に示すように、人工咀嚼モデルを構築する。ヒトは、舌式咀嚼において、舌と口蓋を用いて食品破断中の形態変化と力応答を同時に感知している。この基本原理に基づいて、弾性可変型模擬舌、圧縮プレートおよび圧力分布センサから構成される人工咀嚼モデルを構築する。模擬舌上で食品を圧縮・破断し、その過程の圧力分布を計測する。以上のようにして、官能評価値が異なるモデリング用ゲル食品の圧力分布データを収集する。

【食感推定式の導出】 図1(b)上段に示すように、圧力分布データと官能評価値との関係を示す数理モデルを作成する。圧力分布データに画像テクスチャ解析、主成分分析、重回帰分析を適用し、圧力分布データから食感官能評価値を

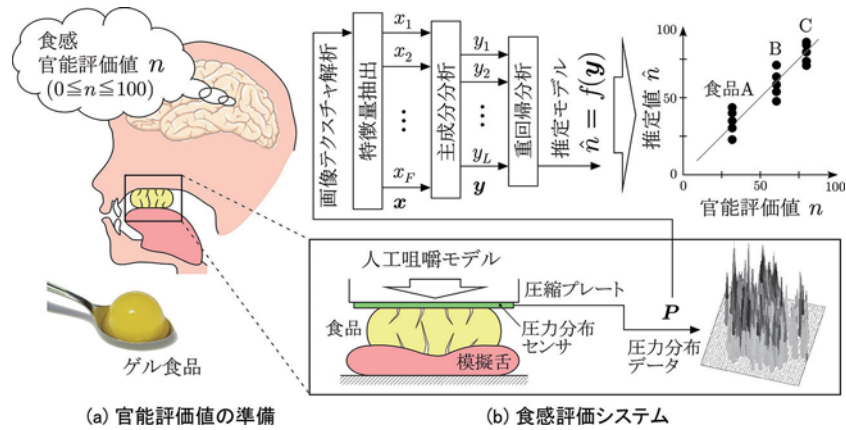


図1 高齢者向けゲル状食品の食感評価システム

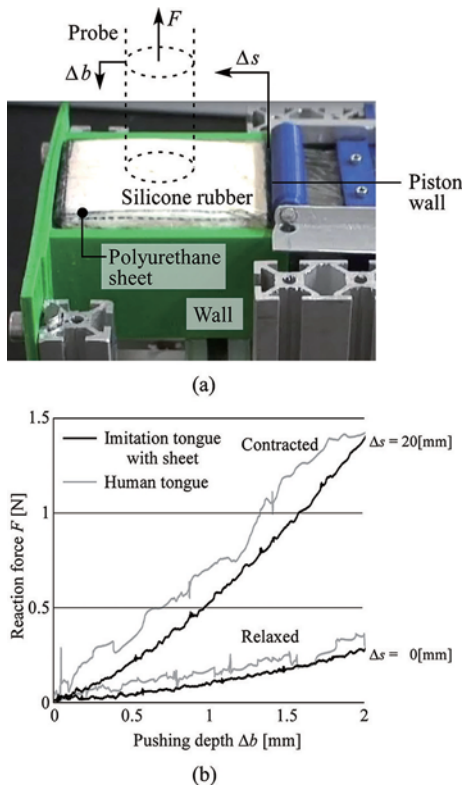


図2 弾性可変型模擬舌とその特性

推定するモデル式を導出する。

②弾性可変型模擬舌の開発

図2(a)に、開発した弾性可変型模擬舌を示す。模擬舌は、シリコン弾性体をベースとし、側面・底面の拘束壁、上面のポリウレタン弾性シートから構成される。一つの拘束壁をピストン状に移動させてシリコン弾性体に予圧縮 Δs を与えることで、上面からの押し込み量 Δb

に対する反力 F を調整できる仕組みとなっている。シリコン弾性体は、幅65[mm]、奥行き50[mm]、高さ35[mm]の直方体、ヤング率は1.1[kPa]である。ポリウレタン弾性シートは、厚さ0.03[mm]、ヤング率約700[kPa]である。側面および底面の拘束壁はABS樹脂製である。1つの側壁はリニアスライダによってピストン状に並進運動することができ、予圧縮量 Δs を調整可能となっている。

図2(b)の黒線に、 $\Delta s=0$ および $\Delta s=20$ [mm]における、押し込み量 Δb と反力 F との関係を示す。ただし、円筒プローブの直径は $\Delta s=20$ [mm]とし、これは後述の食感推定実験で用いる円柱状ゲル食品の直径と一致させている。図2(b)より、押し込み量の増加に応じて反力が増加することが確認できる。したがって、このような予圧縮量の範囲においては、模擬舌の弾性を任意に調整可能であることがわかる。また、図2(b)の灰色線に、ヒトの舌の弛緩状態および収縮状態において同様の測定（舌をアルミ製土台に乗せ、上方からプローブで押し込んだ際の押し込み量 Δb と反力 F を測定）を行って得た結果の一例を示す。この結果より、ヒトの舌の弛緩状態と模擬舌の予圧縮量 $\Delta s=0$ [mm]の状態、ならびに、収縮状態と予圧縮量 $\Delta s=20$ [mm]の状態は、それぞれよく一致していることがわかる。以降では、弾性可変型模擬舌に予圧縮量 $\Delta s=0$ [mm]および $\Delta s=20$ [mm]を与えた状態を、それぞれ模擬舌の弛

緩状態および収縮状態と称することにする。

③模擬舌を用いた食感評価システムの構築

弾性可変型模擬舌を導入した食感評価システムを構築した。模擬舌の弾性状態に対して、ゲル食品を圧縮・破断した際の圧力分布がどのように変化するか、食感推定精度がどのように変化するか、について実験的に考察した。

《実験システム》

図3に、実験システムの概要を示す。模擬舌の上にゲル食品を置き、上方から剛体プレートを降下させて圧縮・破断操作を行う。剛体プレートはリニアスライダによって動作する。模擬舌のピストン壁は別のリニアスライダによって動作し、予圧縮量を調整して模擬舌の弾性を変化させることができる。二つのリニアスライダはPCによって制御される。剛体プレートの下面には、圧力分布センサ（ニッタ株式会社製：空間分解能1[mm]，時間分解能10[ms]，測定範囲44[mm]×44[mm]，圧力分解能0.2[kPa]）が取り付けられている。ゲル食品は、直径20[mm]，高さ10[mm]の円柱形とし、模擬舌の上面中央付近に置かれる。今回の圧縮・破断操作は、圧縮プレートに速度2[mm/s]の下降動作を、プレートが模擬舌上面から1[mm]上方に位置するまで与える。以上の間の圧力分布を時系列データとして記録し、PCに保存する。

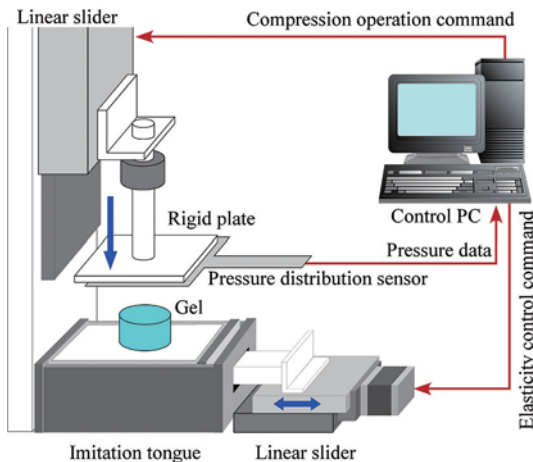


図3 実験システム

図4に、ゲル食品の圧縮・破断中の圧力分布データ例を示す。図4(a)は模擬舌を弛緩状態に設定した場合、図4(b)は模擬舌を収縮状態に設定した場合、図4(c)は剛体土台を用いた場合である。図中において、ピクセル色が白から黒に変化していくほど、圧力値が高いことを示している。図4より、同一種類のゲル食品であっても、模擬舌の弾性に依りて、圧縮・破断状態が明快に異なることがわかる。

《食感推定実験》

モデリング用ゲル食品として、6種類の市販ゲル食品A～Fを使用した。食感評価項目として、「もちもち感：破断前の柔らかく伸び、舌を押し返す印象」，「つるつる感：破断前の表面の滑らかさ」，「ねっとり感：破断後の付着して押し広げにくい印象」，「ざらざら感：破断後の表面のざらつき」の4種類を用いた。はじめに、Visual analog scale法に基づく官能試験を実施し、各食感評価項目について、試験員8名の評価値の平均値を教師データとして用いる官能評価値 n とした。次に、実験システムを用いて、各ゲル種6個ずつ、計36個のゲル食品の圧縮・破断中の圧力分布データ P を計測した。この圧力分布データ群に以下の解析を施し、食感推定式を導出した。まず、各圧力分布データ

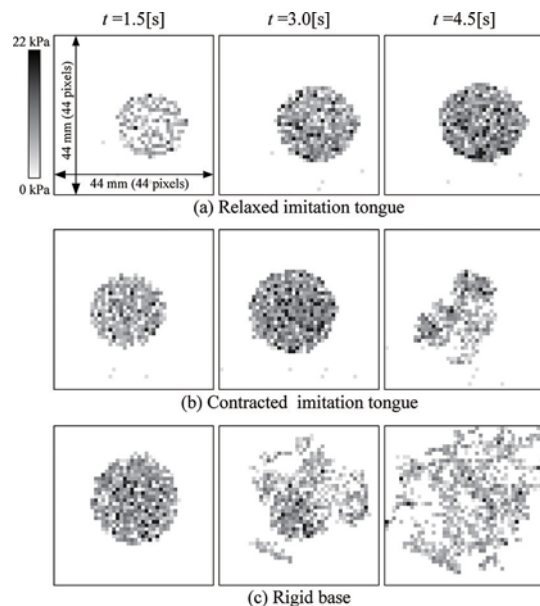


図4 圧力分布の相違

に空間濃度レベル依存法を適用し、特徴量ベクトル \mathbf{x} を算出する (1002 次元)。続いて、特徴量ベクトルの次元を圧縮するとともに多重線形性を取り除くために主成分分析を施し、主成分ベクトル \mathbf{y} を算出する (25 次元程度)。最後に、主成分ベクトル \mathbf{y} を説明変数、官能評価値 n を目的変数とした線形重回帰モデルを作成し、食感評価項目ごとの食感推定式 $\hat{n}=f(\mathbf{y})$ を導出した。導出された推定式を用いて、食感評価項目ごとに、ゲル食品 A~F の食感推定値 \hat{n} を算出した。以上の推定実験を、弛緩状態の模擬舌、収縮状態の模擬舌、および剛体土台を用いた 3 条件の下で実施した。

図 5 に、ゲル状食品 A~F に対して、それぞれ 6 個ずつ、収縮状態の模擬舌を用いて「ざらざら感」を推定した結果を示す。横軸はヒトの食感官能評価値、縦軸は提案システムによる食感推定値であり、高精度に推定できていることがわかる (決定係数: $R^2=0.95$)。

図 6 に、4 つの食感評価項目ごとに 3 つの模

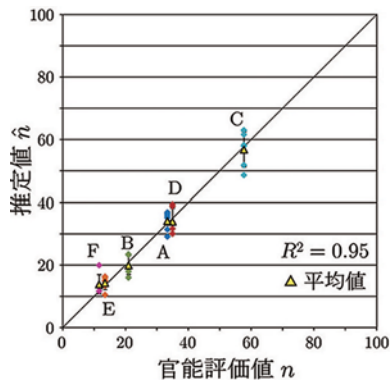


図 5 食感推定結果 (ざらざら感)

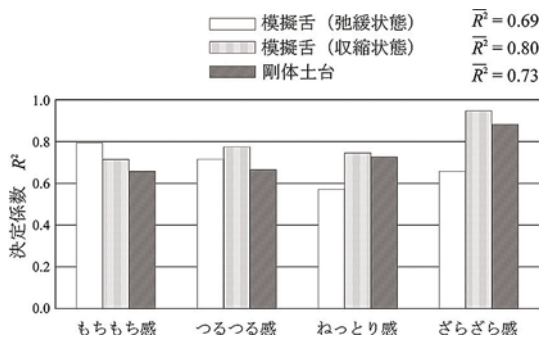


図 6 模擬舌弾性と推定精度の関係

擬舌の弾性状態における決定係数を比較した結果を示す。決定係数の平均値 \bar{R}^2 は、収縮状態の模擬舌を用いた場合が最大であり、今回の実験条件において弾性状態を統一するのであれば収縮状態が最適と言える。ただし、興味深いことに、「もちもち感」については、弛緩状態の模擬舌を用いた場合に決定係数が最大となる。ヒトは、舌筋を軟化させることで、あえて舌の受動変形を大きくし、「もちもち感」に対する感度を向上させている可能性がある。弛緩状態の模擬舌が、このような状況に対応したことは十分に考えられる。以上のように、食感評価項目とゲル食品の種類に応じた適切な模擬舌の弾性が存在することがわかる。

[今後の研究の方向, 課題]

食感推定精度向上に向けて、今回は、模擬舌の導入といったハードウェア面からのアプローチに重点を置いた。一方で、圧縮プレート制御や食感推定処理といったソフトウェア面から、ヒトの舌の柔軟性を再現するアプローチも考えられる。模擬舌ハードウェアと制御・推定ソフトウェアの組合せが、どのように食感推定に貢献するかについて今後検証していく予定である。

[成果の発表, 論文等]

- [1] 柴田暁秀, 石原清香, 中尾理美, 池上聡, 中馬誠, 東森充: 弾性可変型模擬舌を用いた食品テクスチャセンシング, 日本ロボット学会誌, vol. 34, no. 9, pp. 631-639, 2016.
- [2] A. Shibata, A. Ikegami, S. Nakao, S. Ishihara, M. Nakauma, and M. Higashimori: Food Texture Sensing by Using Imitation Tongue with Variable Elasticity, Proc. of 2016 IEEE/SICE SII2016, pp. 421-427, 2016.
- [3] S. Kumakura, A. Shibata, and M. Higashimori: Texture Evaluation System of Paste Food by Using Elastic Imitation Tongue, Proc. of IEEE SMC 2016, pp. 4781-4786, 2016.