

咀嚼圧力分布情報に基づく介護用ゲル状食品の食感評価システム

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

1 はじめに

高齢者や障害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、Quality of Life の観点から、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[1]。美味しさは、食品の化学的性質＝味や香りのみでなく、咀嚼・嚥下過程における食品の物理的性質＝食感（舌触り、口溶け、喉越しなど）にも強く依存する[2]。食感は、機械的特性（かたさ、もろさ、など）と幾何学的特性（粒子の大きさと形、など）に大別され[3]、原則、ヒトがアンケート形式で直接判断する官能試験によって評価される。ところが、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、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。以上を踏まえ、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おり[4]～[16]、特に、機械的特性については評価用機器が実用化されている[5][6]。著者らも、ゲル食品を対象とした評価技術の開発に取り組み、食品圧縮・破断中の圧力分布情報から、素材の異なるゲル食品を判別可能なこと[15]、機械的特性のみでなく幾何学的特性についても食感評価可能なこと[16]を示している。しかしながら、以上のような従来手法では、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点に注意されたい。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、剛体のみ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（破断片の大きさ、広がり方）が大きく異なる恐れがある。したがって、機器測定による食感評価結果をヒトの官能評価結果に近づけるためには、直感的に、両者の環境を近づけることが望ましい。実際、神山らのグループは、食品と舌を模倣したゴム状弾性体を重ねた状態で破壊試験を行い、「舌で潰して食べられる食品か、あるいは歯で噛まなくてはならない食品か」を判定可能なことを示している[17]。ただし、舌の弾性は、舌筋の弛緩状態から収縮状態で4倍以上も変化し[18]、さらに年齢や健康状態に依存する可能性がある点に注意されたい。このようなヒトの舌の弾性変化と舌上で感知する繊細な食感とを関連づけて評価する手法は確立されていないのが現状である。

本研究では、ヒトの舌の弾性変形を考慮した食感評価手法を構築することを目的とする。ここでは、舌式咀嚼可能なゲル食品を対象として取り扱う。提案手法は、従来手法[16]に準拠し、人工咀嚼モデルにおける食品圧縮・破断操作、および圧力分布解析に基づく食感推定処理から構成される。今回、食感推定精度の向上に向けて、人工咀嚼モデルのハードウェア面に工夫を凝らすアプローチを取り入れる。はじめに、新たに導入する弾性可変型模擬舌の基本原理解について示す。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を与えることで、シリコン弾性体上面からの押し込み量に対する反力を調整できる仕組みとなっている。ここでは、プロトタイプによる基礎実験を行い、ヒトの舌の弛緩状態から収縮状態までの弾性を再現可能なことを示す。次に、模擬舌を用いたゲル食品の圧縮・破断実験を行い、その過程における一連の圧力分布を計測する。ここでは、模擬舌の弾性に応じて圧力分布が明快に異なることを明らかにする。最後に、圧力分布から食感の官能評価値を推定する実験を行い、食感評価項目およびゲル食品の種類に応じて、推定精度を向上させるための適切な模擬舌の弾性が存在することを示す。

2 関連研究

食感の機械的特性の評価に関して、食品の圧縮・破断試験で得られる反力応答に基づいたテクスチャプロファイル法[4]が確立され、この原理を用いた測定機器が製品化されている[5][6]。また、ロボティクス技術を駆使した食感評価に関する研究が行われており、Iwata らはヒトが食品を噛む力を呈示する力覚装置を開

発している[7]。Sunらは咀嚼ロボットを開発し、食品咀嚼中の3次元力を測定している[8]。Xuらは咀嚼ロボットで食品を噛むために必要なアクチュエータトルクを評価している[9]。これらの研究は力やトルク応答に基づいた機械的特性の評価に対応する。一方、幾何学的特性の評価に向けた研究として、Hoeblerらはパスタ[10]を、Tournierらはパン[11]を対象とし、ヒトが咀嚼した後の食品の幾何学的状態（破断片の大きさ、形状、など）を画像解析により評価している。Arvisenetらは人工咀嚼装置を開発し、リンゴ破断片の状態を画像解析により識別している[12]。Kohyamaらはクラッカーの水分と咀嚼する際に口腔内で生じる圧力分布との関係について議論している[13]。また、羊羹、食パン、人参の咀嚼について口腔内の圧力分布特性について議論している[14]。著者らはゲル食品を圧縮・破断する際の圧力分布を解析し、機械的および幾何学的特性を推定する手法を提案している[15][16]。以上の従来研究では剛体機器が使用されており、ヒトの舌の弾性変形は考慮されていない。

3 食感評価システムの全容

提案する食感評価手法は、著者らの従来手法[16]に準拠する。ただし、従来手法では剛体プレートと剛体土台を用いた圧縮試験を行っていたのに対し、提案手法では、弾性可変型模擬舌を用いた食品の圧縮・破断操作を導入する点が決定的に異なる。概要を以下に示す。

【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しておく。官能評価値は、実際にヒトが舌式咀嚼により試食する官能評価試験により取得する。官能評価値 n_i は、食感評価項目 i （例えば、“もちもち感： $i=1$ ”、“つるつる感： $i=2$ ”、など）ごとに設定する。

【人工咀嚼モデルを用いた圧力分布計測】 図1(b)に示すような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、剛体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 P 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(c)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。はじめに、圧力分布データ P に画像テクスチャ解析手法を適用し、特徴量ベクトル x を算出する。続いて、主成分ベクトル y を算出する。最後に、主成分ベクトル y を説明変数、官能評価値 n_i を目的変数とした重回帰モデルを作成し、食感推定式 $\hat{n}_i = f_i(y)$ を導出する。

以上の手順で得た食感推定式を用いることにより、ゲル食品の圧縮・破断時の圧力分布データ P から食感の官能評価値 n_i を推定することができる。

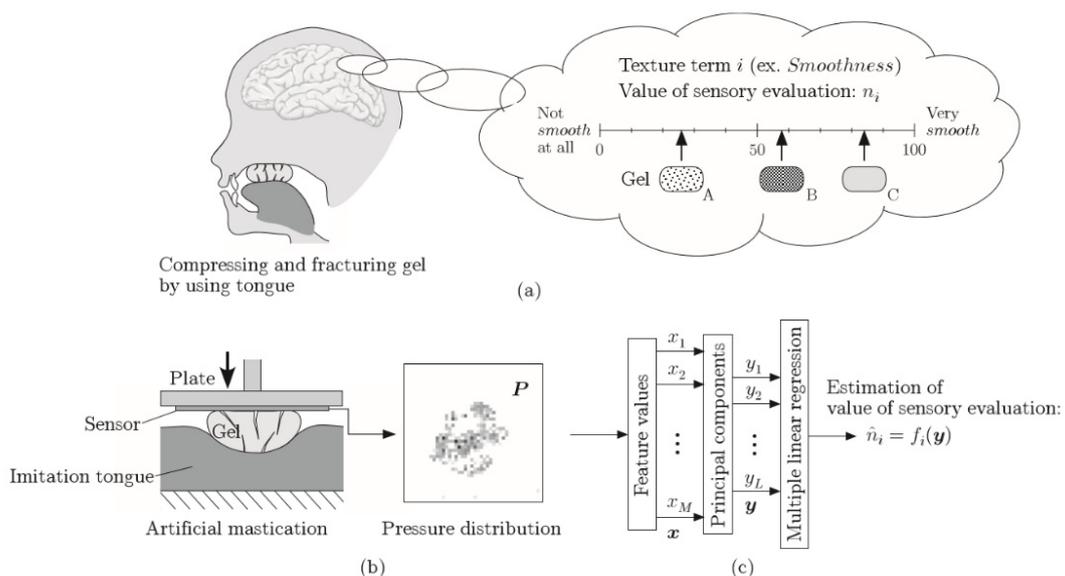


図1 提案する食感評価システムの概要

4 弾性可変型模擬舌

本章では、人工咀嚼モデルに新たに導入する弾性可変型模擬舌の基本原理を示し、プロトタイプを用いた弾性可変特性の検証実験について示す。

4-1 弾性可変原理

一般に、模擬生体組織（皮膚、臓器など）の主素材として、シリコンが用いられる。はじめに、図 2(a-i)に示すようなシリコン弾性体をベースとした模擬舌を考える。弾性体の側面と底面は剛体壁で拘束されているものとし、図 2(b-i)に示すように、一つの側壁はピストン状に並進移動できるものとする。ピストン壁の初期位置からの移動量を弾性体に与える予圧縮量 Δs とする。まず、図 2(a-i)に示すように、ピストン壁がシリコン弾性体に接した状態 ($\Delta s = 0$) を考える。この状態で、図 2(a-ii)に示すように、弾性体を上面から円柱プローブで Δb だけ押し込むと、弾性によって反力 $F_a(0)$ が生じる。次に、図 2(b-i)に示すように、ピストン壁を移動させて弾性体に予圧縮を与えた状態 ($\Delta s > 0$) を考える。この場合、予圧縮により弾性体が上方に盛り上がる。図 2(b-ii)に示すように、プローブを弾性体との初期接触位置から Δb だけ押し込んだ際の反力 $F_a(\Delta s)$ は、予圧縮の影響により元の反力 $F_a(0)$ と比べてわずかに上昇する。ただし、反力の大きさを広範囲で調整することは期待できない。

次に、図 3(a-i)に示すように、シリコン弾性体の上面を薄膜状弾性シートで被った模擬舌を考える。なお、弾性シートのヤング率は、弾性体よりも十分大きいものとする。弾性シートの一端は側壁（図中右）に固定されており、もう一端はピストン壁上部の開口部を經由して逆の側壁（図中左）に固定されている。このとき、弾性シートは自然状態として張力はゼロとする。図 3(a-ii)に示すように、ピストン壁が弾性体に接した状態 ($\Delta s = 0$) において、上面からプローブを Δb だけ押し込むと反力 $F(0)$ が生じる。この反力 $F(0)$ は、弾性シートの弾性分だけ、図 2(a-ii)の反力 $F_a(0)$ よりも大きくなる。次に、図 3(b-i)に示すように、ピストンを移動させて弾性体に予圧縮を与えた状態 ($\Delta s > 0$) を考える。この場合、予圧縮により弾性体が上方に膨れ上がることで、弾性シートの張力 T が増加する。図 3(b-ii)に示すように、プローブを押し込むとさらに張力 T は増加し、反力 $F(\Delta s)$ を $F(0)$ より大幅に増加させる効果が生じる。以上のように、弾性体を被う弾性シートの効果により、押し込み量 Δb に対する反力 $F(\Delta s)$ を、予圧縮量 Δs によって広範囲で調整することが可能となる（弾性シートのヤング率が小さい場合は図 3 の弾性体単体模擬舌と等価となり、反力調整効果は生まれぬ）。以上のような予圧縮量 Δs によって調整される模擬舌の擬似的な可変弾性を、ばね定数 $K(\Delta s) = F(\Delta s)/\Delta b$ で表すことにする。なお、予圧縮による模擬舌上面の盛り上がりは模擬舌長に対して十分に小さいものとし、模擬舌の初期幾何学形状が対象の圧縮・破断に及ぼす影響については議論の対象外とする。

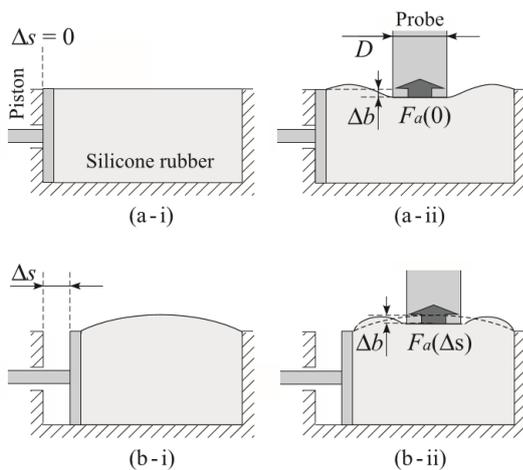


図 2 シリコン単体による模擬舌

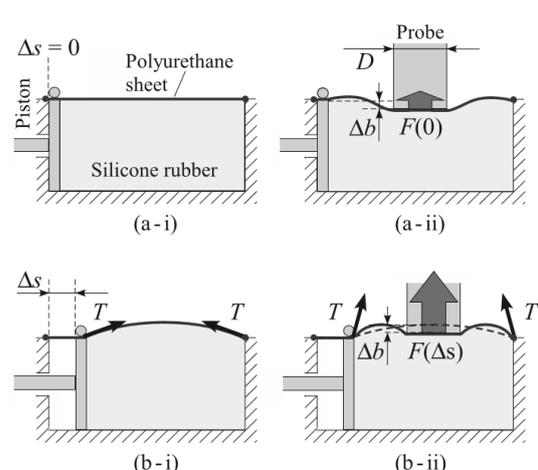


図 3 弾性可変型模擬舌の基本原理

4-2 プロトタイプによる弾性可変特性の確認

図4に、開発した弾性可変型模擬舌のプロトタイプの外観を示す。シリコン弾性体は、幅65[mm]、奥行き50[mm]、高さ35[mm]の直方体である。ヤング率は $E = 11.1$ [kPa]（圧縮量2[mm]における応力/ひずみ）であり、ヒトの舌弾性を再現できるように試行錯誤的に設定している。薄膜状弾性シートとして、厚さ0.03[mm]、ヤング率約700[kPa]のポリウレタンシートを用いている。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。このようなプロトタイプ模擬舌の弾性 $K(\Delta s)$ の可変特性について実験的に調べる。

図5の実線に、予圧縮量 Δs を変化させた際の押し込み量 Δb —反力 $F(\Delta s)$ 特性について示す。ただし、予圧縮量は $\Delta s = 0 \sim 20$ [mm]の範囲で2[mm]ごとに変化させ、それぞれについて、模擬舌の上面中央部を円筒プローブで $\Delta b = 2$ [mm]まで押し込んでいる。円筒プローブの直径は $D = 20$ [mm]とし、これは食感推定実験（第5章）で用いる円柱状ゲル食品の直径と一致させている。プローブはリニアガイドによって鉛直方向に可動し、リニアエンコーダおよびロードセルで、それぞれ押し込み量 Δb および反力 F を測定する。なお、今回は静特性のみに着目するものとして、押し込み速度は十分に遅くしている。図5より、押し込み量 Δb の増加に応じて反力 F が増加すること、ならびに、予圧縮量 Δs の増加に対して Δb — F 特性線がほぼ一様に上昇していくことが確認できる。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 $K(\Delta s)$ を任意に調整可能であることがわかる。また、薄膜状弾性シートを用いずにシリコン弾性体と拘束壁のみで構成された模擬舌における同特性を、図5の破線で示す。予圧縮量 Δs を0[mm]から20[mm]へ増加させているにもかかわらず、両者の反力には大きな違いはない。このことから、模擬舌の可変弾性を実現する上での弾性シートの重要性を確認できる。

次に、弾性可変型模擬舌とヒトの舌の特性を比較する。図6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 Δb と F を測定）を行って得た結果の一例を示す。被験者に対して、弛緩状態は舌に力を入れずに柔らかくするように、収縮状態は舌に力を入れて硬くするように指示している。なお、同図には、弾性可変型模擬舌に予圧縮量 $\Delta s = 0$ [mm]および $\Delta s = 20$ [mm]を設定した際の結果を再掲している。図6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、弛緩状態と予圧縮量 $\Delta s = 20$ [mm]の状態は、それぞれよく一致していることがわかる。この結果に基づき、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。図7に、ヒトの舌および模擬舌について、 Δb — F 特性線を線形近似（線形近似の R^2 値は、模擬舌の弛緩状態 $R^2 = 0.95$ および収縮状態 $R^2 = 0.97$ 、ヒトの舌の弛緩状態 $R^2 = 0.88$ および収縮状態 $R^2 = 0.97$ ）して算出した弾性 K を示す。ただし、ヒトの舌に関しては、22歳～24歳の被験者4名×測定5回の平均値である。ヒトの舌は、弛緩状態で $K_{relax} = 0.15$ [N/mm]、収縮状態で $K_{cont} = 0.67$ [N/mm]である。なお、収縮状態のばらつきが大きいのは、計測中（約5[s]）に一定の収縮状態にすることが難しく、被験者ごとの個人差が顕著となったことに起因している。一方、模擬舌は、弛緩状態で $K(0) = 0.12$ [N/mm]、収縮状態で $K(20) = 0.63$ [N/mm]である。弛緩状態から収縮状態になることで、ヒトの舌の弾性は4.5倍に、模擬舌の弾性は5.3倍に増加している。以上のように、今回開発した弾性可変型模擬舌によって、ヒトの舌の弾性可変特性を十分に再現できることがわかる。

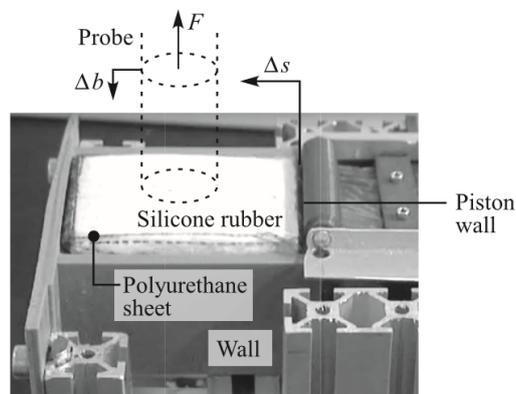


図4 弾性可変型模擬舌のプロトタイプ

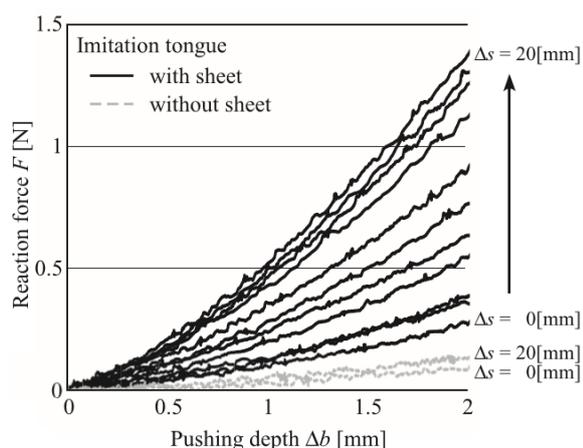


図 5 模擬舌における押し込み量 Δb 、反力 F 、予圧縮量 Δs の関係

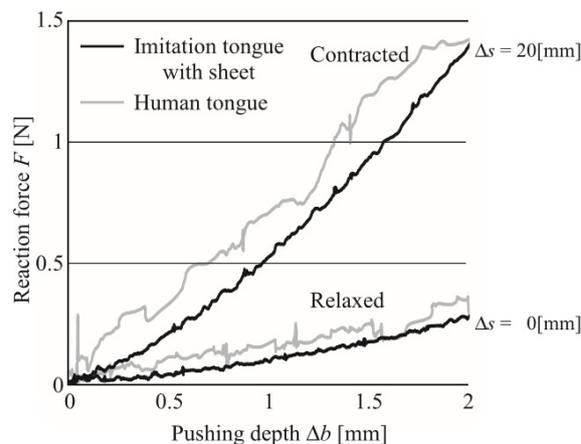


図 6 ヒトの舌の弛緩状態および収縮状態における押し込み量 Δb と反力 F の関係

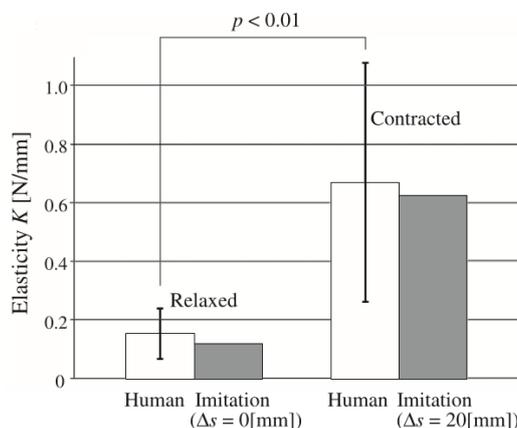


図 7 模擬舌とヒトの舌の弾性比較

5 模擬舌を用いた食感評価

本章では、弾性可変型模擬舌を導入した食感評価システムを構築する。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、食感の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する。

5-1 実験システム

図 8(a)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下ろさせて圧縮・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、以下の通りとする。剛体プレートに速度2[mm/s]の下降動作を与え、ゲル食品の上面と接触した時刻を $t = 0$ [s]とする。そのまま下降動作を継続し、 $t = 4.5$ [s]でプレートを静止させる。なお、 $t = 4.5$ [s]の時点でプレートは模擬舌上面から1[mm]上方に位置する。今回、過大圧力の回避と接触判別（プレートーゲル食品/プレートー模擬舌）の簡単化のため、プレートと模擬舌との直接の接触は避けるものとし、この時点で操作

を終了する。以上の間 ($0 \leq t \leq 4.5[s]$) 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 8(b) は、実験例として弛緩状態に設定された模擬舌上でゲル食品を圧縮・破断している様子を、カメラで側面から撮影した写真である。この場合、ゲル食品は模擬舌にめり込んでいき、圧縮・破断状況を視覚的に確認することはできない。

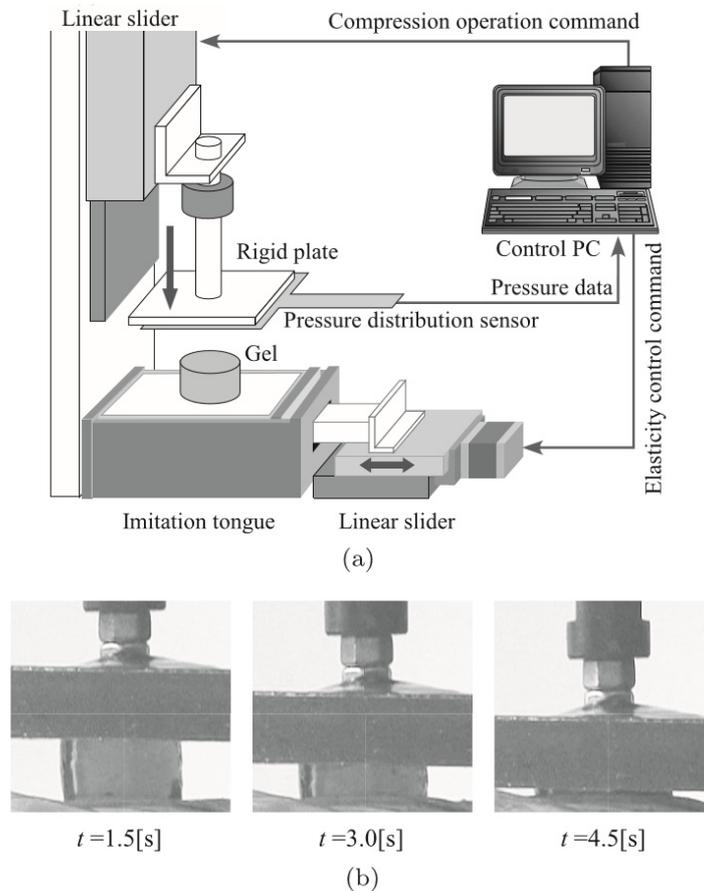


図 8 実験システム

5-2 模擬舌の弾性状態に対する圧力分布の相違

図 9 に、ゲル食品の圧縮・破断中の圧力分布データ例を示す。ただし、図 9(a) は模擬舌を弛緩状態に設定した場合、図 9(b) は模擬舌を収縮状態に設定した場合、図 9(c) は模擬舌ではなく剛体土台を用いた場合（従来手法[16]に対応）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 9(a) に示すように、弛緩状態の模擬舌上では、圧力の立ち上がりは遅い ($t = 1.5[s]$)。これは、模擬舌表面が凹むように受動変形することに起因しており、プレートが下降が進んでもゲル食品の円筒形状に従った圧力分布が浮き彫りになっていくだけで ($t = 3.0[s]$)、破断を示す拡散するような圧力分布は最後まで見られない ($t = 4.5[s]$)。次に、図 9(b) に示すように、収縮状態の模擬舌上では、弛緩状態と比較して圧力の立ち上がりが早くなる ($t = 1.5[s]$)。これは、模擬舌の弾性増加に伴って反力が大きくなることに起因している。その後、圧力は一層上昇する ($t = 3.0[s]$)。最終的にゲル食品は破断し、これに応じた圧力分布の散布状況が確認できる ($t = 4.5[s]$)。このとき、ゲル食品は完全に細かく砕け散ることなく、ある程度大きな破断片を含む状態となっている。また、模擬舌は破断片を包み込むように受動変形するため、破断片は拡散することなく、ほぼ元々の領域内に収まっている。最後に、図 9(c) に示すように、剛体土台を用いた場合、圧縮開始後の早い段階で圧力が高くなり ($t = 1.5[s]$)、ゲル食品の破断も早く起こり、これに応じた圧力分布の散布状況が見られる ($t = 3.0[s]$)。プレートが下降に合わせて圧力分布は広く拡散した状態になっていく ($t = 4.5[s]$)。このとき、ゲル食品はほぼペースト状になるまで細かく破断された状態になっ

ている。上のように、同じゲル食品であっても模擬舌の弾性に応じて、 $0 \leq t \leq 4.5$ [s]における圧縮・破断状態が明快に異なることがわかる。

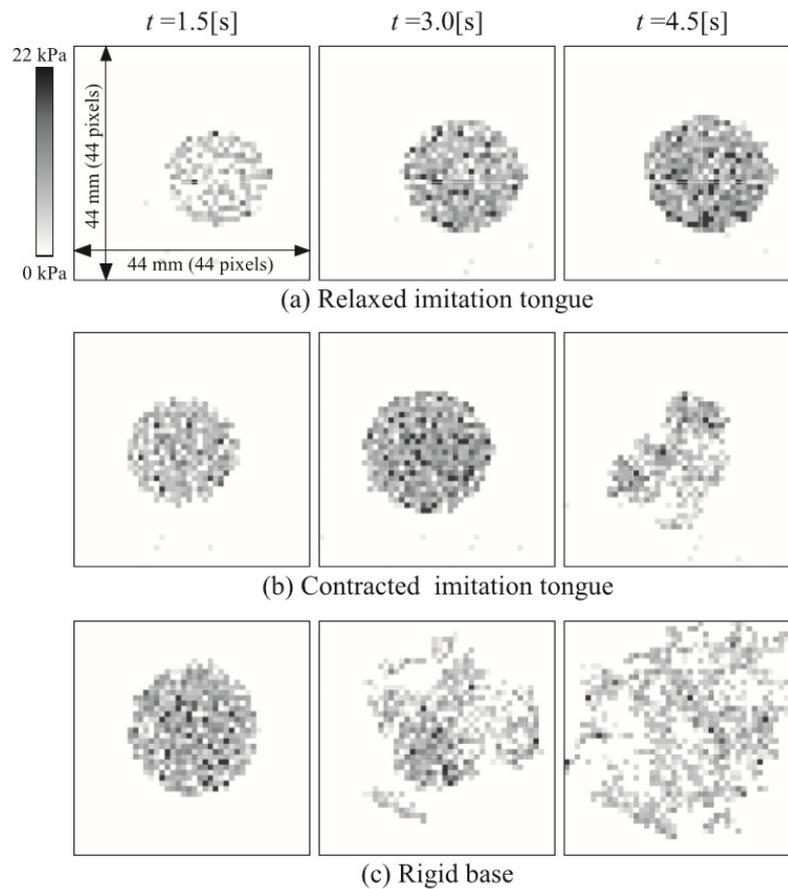


図9 圧力分布の相違

5-3 食感推定実験

ゲル食品の食感推定実験により、弾性可変型模擬舌を用いた提案手法の有効性を検証する。

5-3-1 実験条件・手順

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を使用する。食感評価項目として、“もちもち感 (Elasticity: $i = 1$)”、“つるつる感 (Smoothness: $i = 2$)”、“ねっとり感 (Stickiness: $i = 3$)”、“ざらざら感 (Granularity: $i = 4$)”の4種類を用いる (“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。食感評価の内容が異なるように例題的に選定した)。事前に、Visual analog scale 法[19]に基づく官能試験を実施する。図1(a)に示すように、試験員に食感評価項目*i*ごとに官能評価の度合いをマークする用紙を与える。この用紙には長さ100[mm]の直線が描かれ、その左端には「全く感じない」、右端には「非常に感じる」と記述してある。試験員は、ゲル食品A~Fについて、試食した際に舌上で感じた食感の度合いを直線上にマークする。マークされた位置を0~100[mm]の整数値として測定し、この値を各ゲル食品の官能評価値とする。今回、試験員8名で上記の官能試験を実施し、平均値を教師データとして用いる官能評価値 n_i とする。次に、実験システムを用いて、1種類につき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 を計測する。この圧力分布データ群に以下の解析を施し、食感推定式を導出する(解析手順の詳細は、文献[16]を参照されたい)。各圧力分布データに空間濃度レベル依存法[20]を適用し、

特徴量ベクトル \mathbf{x} を算出する。なお、 \mathbf{x} の次元は $M = 1002$ である。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。最後に、主成分ベクトル \mathbf{y} を説明変数、官能評価値 n_i 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 i の食感推定式

$$\hat{n}_i = a_{i0} + a_{i1}y_1 + a_{i2}y_2 + \dots + a_{iL_i}y_{L_i}$$

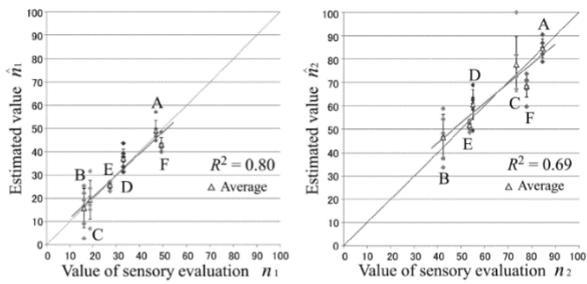
を導出する。ただし、 a_{i0} は定数項、 a_{il} ($l = 1, 2, \dots, L_i$)は偏回帰係数である(表 1)。導出された推定式を用いて、食感評価項目 i ごとに、ゲル食品 A~F の食感推定値 \hat{n}_i を算出する。以上の食感推定実験を、弛緩状態の模擬舌、収縮状態の模擬舌、および剛体土台を用いた 3 条件の下で実施し、それぞれについて食感推定値を算出する。

表 1 定数項および偏回帰係数

	L_i	a_{i0}	a_{i1}	a_{i2}	a_{i3}	a_{i4}	a_{i5}	a_{i6}	a_{i7}	a_{i8}	a_{i9}	a_{i10}	a_{i11}	a_{i12}	a_{i13}
<i>Elasticity: i = 1</i>	6	31.92	-0.17	1.26	-1.56	-1.35	-0.97	-1.59							
<i>Smoothness: i = 2</i>	25	31.96	0.25	1.09	-0.90	-0.97	4.34	-0.95	1.39	1.79	-2.18	-1.45	1.67	0.96	1.63
<i>Stickiness: i = 3</i>	8	64.48	-0.34	-0.55	0.41	-1.78	0.90	-1.61	-1.80	-2.59					
<i>Granularity: i = 4</i>	10	28.71	-0.46	-0.26	-1.38	0.50	-0.56	1.18	-0.89	-0.93	0.88	1.73			

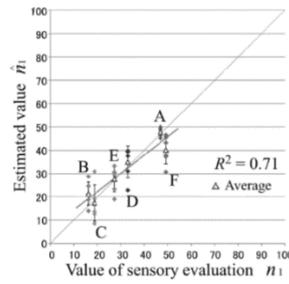
5-3-2 実験結果

図 10~12 に、4種類の食感評価項目について、食感の官能評価値と推定値の関係を示す。ただし、図 10、図 11、および図 12 は、それぞれ弛緩状態、収縮状態、および剛体土台を用いた場合である。なお、Leave-one-out 交差検証法を用いている[21]。以上の結果について、食感の推定精度を決定係数 R^2 で評価する。図 13 に、食感評価項目ごとに3つの模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。4つの食感評価項目における決定係数の平均値 \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。収縮状態の模擬舌を用いた場合は、すべての食感評価項目において剛体土台を用いた場合よりも決定係数が上昇しており、従来手法[16]と比較して、食感の推定精度が平均で10%向上することがわかる。これは、図 9(b)に示すような圧力分布データにおいて、ゲルの圧縮と破断の二つの状態が、ヒトの舌式咀嚼に近いという観点でバランス良く含まれたためではないかと考えられる。一方で、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”の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。また、弛緩状態の模擬舌では、“ねっとり感”と“ざらざら感”の決定係数が他よりも著しく低下している。これは、図 9(a)の例で示したように、本来ヒトが舌筋を硬化させることで破断可能なゲル食品の中に、弛緩状態の模擬舌では破断不可能なものが存在したためと想定される。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。



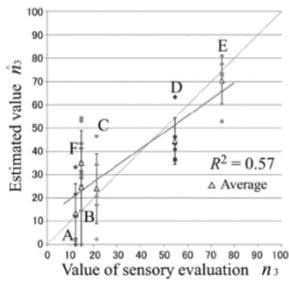
Elasticity: $i = 1$

Smoothness: $i = 2$

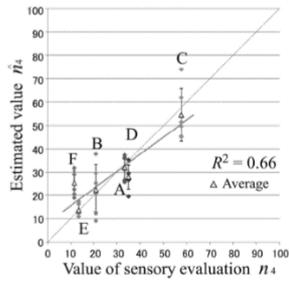


Elasticity: $i = 1$

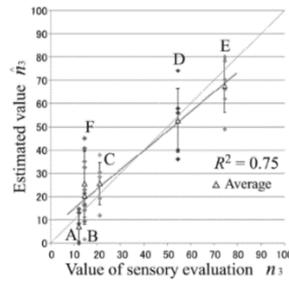
Smoothness: $i = 2$



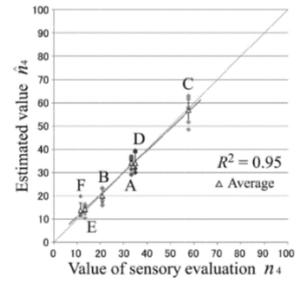
Stickiness: $i = 3$



Granularity: $i = 4$



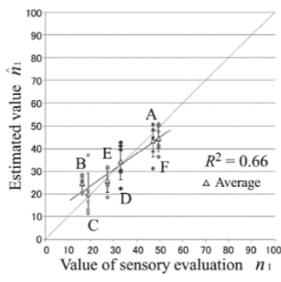
Stickiness: $i = 3$



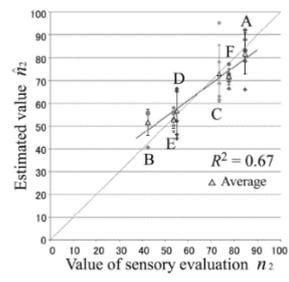
Granularity: $i = 4$

図 10 推定結果 (弛緩状態の模擬舌)

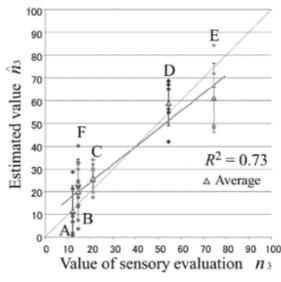
図 11 推定結果 (収縮状態の模擬舌)



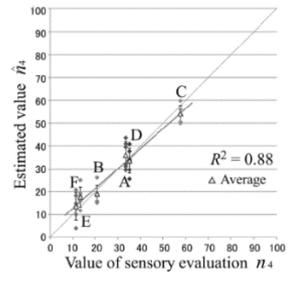
Elasticity: $i = 1$



Smoothness: $i = 2$



Stickiness: $i = 3$



Granularity: $i = 4$

図 12 推定結果 (剛体土台)

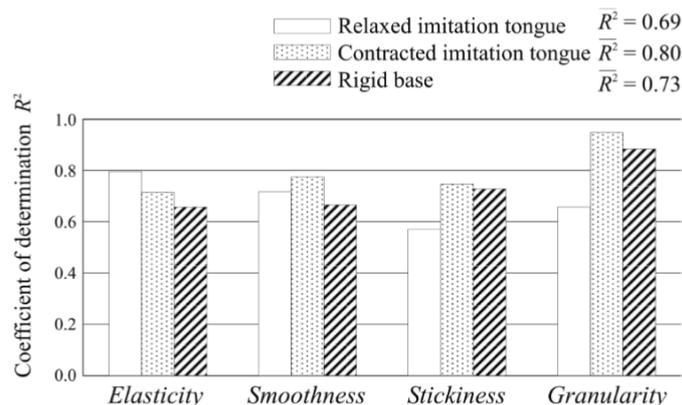


図 13 推定精度（決定係数）の比較

6 結論

本研究では、ヒトの舌の弾性変形を考慮したゲル食品の食感評価システムについて議論した。得られた主な結果は、以下の通りである。

- 舌式咀嚼を人工的に再現するための模擬舌を提案し、その基本構造と弾性可変原理を示した。プロトタイプを製作し、ヒトの舌の弛緩状態から収縮状態までの弾性を再現可能なことを示した。
- 模擬舌を導入した人工咀嚼モデルを開発し、模擬舌の弾性状態に応じてゲル食品を圧縮・破断させた際の圧力分布が異なることを示した。
- ゲル食品の食感推定実験を行い、食感評価項目およびゲル食品の種類に応じて、推定精度を向上させるための適切な模擬舌の弾性が存在することを明らかにした。

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、ヒトの舌の柔軟性や押し込み量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、制御・推定ソフトウェア、および両者の組合せが、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きたいと考えている。将来的には、ヒトの年齢や健康状態に依存して変化する舌特性全般（粘弾性、押しつけ動作範囲・速度・時間、最大押しつけ力、など）を考慮し、これらに応じて食感の官能評価値がどのように変わるのか、評価システムにより食感をどの程度正確に推定できるかについて考察する予定である。

【参考文献】

- [1] K. Nishinari: Texture and Rheology in Food and Health. Food Science and Technology Research, vol.15, pp.99-106, 2009.
- [2] T. Funami: Next Target for Food Hydrocolloid Studies: Texture Design of Foods Using Hydrocolloid Technology, Food Hydrocolloids, vol.25, pp.1904-1914, 2011.
- [3] A.S. Szczesniak: Texture is a Sensory Property, Food Quality and Preference, vol.13, pp.215-225, 2002.
- [4] M.C. Bourne: Food Texture and Viscosity, Second Edition: Concept and Measurement, Academic Press, 2002.
- [5] Stable Micro Systems Ltd., <http://www.stablemicrosystems.com/>
- [6] Illinois Tool Works Inc., <http://www.instron.co.uk/wa/home/>
- [7] H. Iwata, H. Yano, T. Uemura, and T. Moriya: Food Texture Display, Proc. of the 12th Int. Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp.310-315, 2004.

- [8] C. Sun, J.E. Bronlund, L. Huang, M.P. Morgenstern, and W.L. Xu: A Linkage Chewing Machine for Food Texture Analysis, Proc. of the 15th Int. Conf. on Mechatronics and Machine Vision in Practice, pp.299-304, 2008.
- [9] W.L. Xu, J.D. Torrance, B.Q. Chen, J. Potgieter, J.E. Bronlund, J.-S. Pap: Kinematics and Experiments of a Life-Sized Masticatory Robot for Characterizing Food Texture, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.55, Issue 5, pp.2121-2132, 2008.
- [10] C. Hoebler, A. Karinthe, M.F. Devaux, F. Guillon, D.J. Gallant, B. Bouchet, C. Melegari, and J.L. Barry: Physical and Chemical Transformations of Cereal Food During Oral Digestion in Human Subjects, British Journal of Nutrition, vol.80, issue 5, pp.429-436, 1998.
- [11] C. Tournier, M. Grass, D. Zope, C. Salles, and D. Bertrand: Characterization of Bread Breakdown During Mastication by Image Texture Analysis, Journal of Food Engineering, vol.113, no.4, pp.615-622, 2012.
- [12] G. Arvisenet, L. Billy, P. Pointot, E. Vigneau, D. Bertrand, and C. Prost: Effect of Apple Particle State on the Release of Volatile Compounds in a New Artificial Mouth Device, Journal of Agricultural and Food Chemistry, vol.56, no.9, pp.3245-3253, 2008.
- [13] K. Kohyama, M. Nishi, and T. Suzuki: Measuring Texture of Crackers with a Multiple-Point Sheet Sensor, Journal of Food Science (Sep-Oct 1997) vol.62, pp.922-925, 1997.
- [14] H. Dan, T. Azuma, and K. Kohyama: Characterization of Spatiotemporal Stress Distribution During Food Fracture by Image Texture Analysis Methods, Journal of Food Engineering, vol.81, no.4, pp.429-436, 2007.
- [15] 東森充, 金子真, 福田修: 咀嚼圧力分布に基づく食品テクスチャセンシング, 日本ロボット学会誌, vol.31, no.8, pp.780-787, 2013.
- [16] T. Yamamoto, M. Higashimori, M. Nakauma, S. Nakao, A. Ikegami, and S. Ishihara: Pressure Distribution-Based Texture Sensing by Using a Simple Artificial Mastication System, Proc. of 36th Annual Int. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp.864-869, 2014.
- [17] 神山かおる, 他: 舌で押しつぶして食しやすい固形状食品の簡易評価法, 特開 2013--64691, 2013.
- [18] A. Shibata, M. Higashimori, I. G. Ramirez-Alpizar, and M. Kaneko: Tongue Elasticity Sensing with Muscle Contraction Monitoring, Proc. of the 2012 ICME Int. Conf. on Complex Medical Engineering, pp.511-516, 2012.
- [19] M.E. Wewers and N.K. Lowe: A Critical Review of Visual Analogue Scales in the Measurement of Clinical Phenomena, Research in Nursing and Health, vol.13, pp.227-236, 1990.
- [20] R.M. Haralick, K. Shanmugam, and I. Dinstein: Textural Features for Image Classification, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, vol.SMC-3, no.6, pp.610-621, 1973.
- [21] S. Arlot: A Survey of Cross-Validation Procedures for Model Selection, Statistics Surveys, vol.4, pp.40--79, 2010.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Food Texture Sensing by Using Imitation Tongue with Variable Elasticity	2016 IEEE/SICE Int. Symp. on System Integration (SII2016)	2016年12月
Texture Evaluation System of Paste Food by Using Elastic Imitation Tongue	2016 IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2016)	2016年10月
弾性可変型模擬舌を用いたゲル状食品の食感評価システム	生体医工学シンポジウム 2016	2016年9月