

弾性模擬舌による凝集性抽出効果に基づく ペースト状食品の食感評価システム

大阪大学大学院 工学研究科
機械工学専攻 金子・東森・高山研究室

熊倉 駿

1. はじめに

介護用食品の研究・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¹⁾一方で、ヒトによる官能試験では時間、コスト、信頼性が重大な懸案事項となっている。このことを踏まえ、機器を用いた物理的測定によって食感を評価する手法が開発されているが、介護用ペースト状食品（以下、ペースト食）については、ヒトが舌上で感知する食感と関連付けて評価する手法は確立されていない。ペースト食の食感評価が困難な一因として、機器測定環境とヒトの口腔内環境の相違が挙げられる。一般的な食品の物性あるいは食感評価装置においては、食品との接触部位（プローブ、容器、台座など）が全て剛体であり、そのような環境下で食品を圧縮したり、かき混ぜたりといった操作が行われる。これに対して、ペースト食はFig.1に示す通り、固形食と異なり、歯で咀嚼する必要は無く、舌と口蓋で押しつぶして喫食される。実際のヒトの舌は柔軟性を有し、Fig.1(b)に示すように、柔軟物同士の間で力学的および幾何学的な相互作用を介して食品の操作が行われている。このため、機器測定環境とヒトの口腔内環境とでは、操作中の食品の形状、広がり方が大きく異なる恐れがある。以上を踏まえ、本研究では、ヒトの舌の弾性変形を考慮し、弾性模擬舌を用いたペースト食の食感評価システムを構築する。

2. 弾性模擬舌によるペースト食の凝集性抽出

2.1 ペースト食の凝集性

ペースト食においては、食べやすさと食べごたえの観点から、舌上でどの程度まとまった状態となっているかが重要となる。この点に着目し、本論文では、ペースト食が一まとまりの状態を維持しようとする性質を、ペースト食の凝集性と称するものとする。凝集性は、物性パラメータ群（粘弾性、外界との接触摩擦など）の組合せによって変化するものと想定される。本研究では、ペースト食の幾何学的および力学的反応を巨視的に観測し、個々の物性パラメータに着目するのではなく、包括的に凝集性を計測する手法について検討する。

2.2 弾性模擬舌による凝集性抽出効果

典型的な圧縮試験装置においては、ペースト食の幾何学形状が圧縮プレートの変位によって一意に決定されるため、両者の凝集性の相違を抽出することはできない。そこで、Fig.2に示すように、弾性模擬舌をベースとして用いる。この場合、Fig.2(a)に示すように、凝集性が低いペースト食の場合、模擬舌は広い範囲で浅く変形する。これに対して、Fig.2(b)に示すように、凝集性が高いペースト食の場合、模擬舌は狭い範囲で深く変形する。以上のように、弾性模擬舌により、ペースト食の凝集性の相違が浮き彫りにされる効果を凝集性抽出効果と呼ぶ。本研究では、抽出した凝集性を定量化するために、圧縮プレ

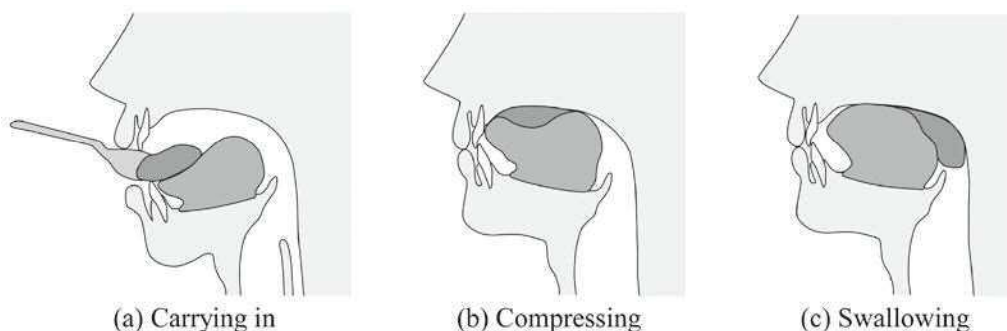


Fig. 1: Process of eating nursing-care paste food

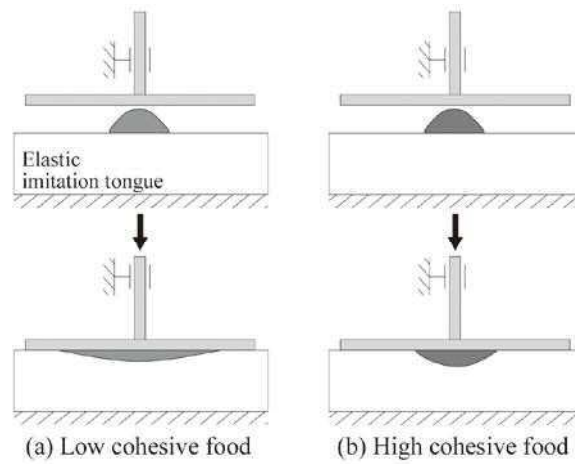


Fig. 2: Process of eating nursing-care paste food

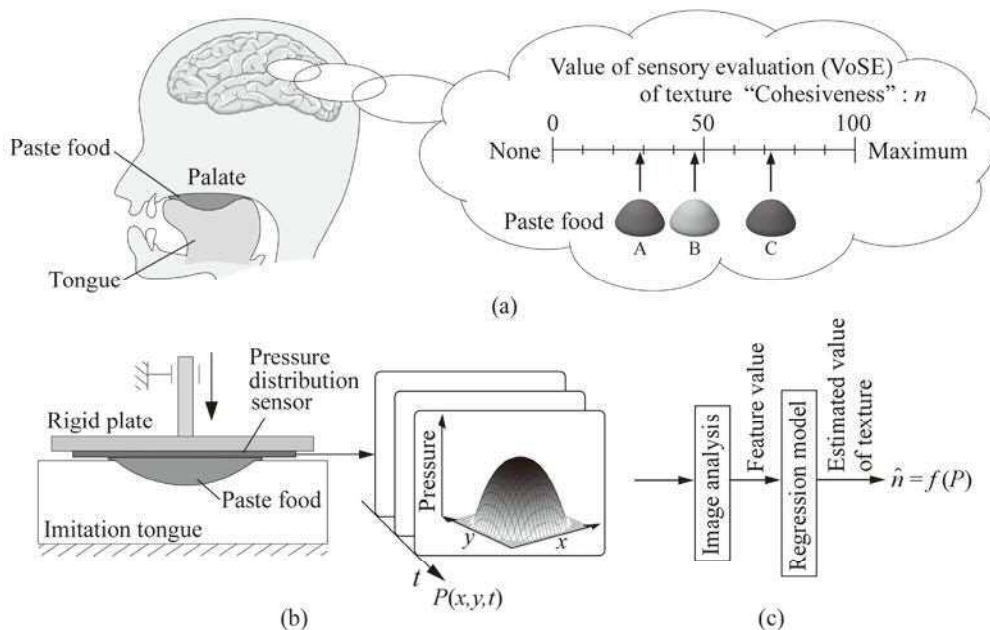


Fig. 3: Outline of the texture evaluation system

ートに面状圧力分布センサを取り付け、ペースト食圧縮時の圧力分布を測定する手法を取る。

3. 食感評価システムの構築

Fig.3に、提案する食感評価システムの全容を示す。食感官能評価値の準備 (Fig.3(a))、圧力分布測定 (Fig.3(b))、食感推定モデル作成 (Fig.3(c)) から構成される。

【食感官能評価の準備】 Fig.3(a)に示すように、複数種類のペースト食について、食感官能評価値 n を準備しておく。官能評価値は、実際にヒトが喫食することによる官能試験により取得する。このデータは、食感推定モデル作成時に教師データとして使用される。

【圧力分布測定】 Fig.3(b)に示すように、弾性模擬舌を導入した圧縮試験装置を用いてペースト食の圧縮試験を行い、圧力分布を測定する。圧力分布は時系

列データ $P(x,y,t)$ として保存する。ここでの計測処理は、圧縮用プレート、弾性模擬舌、圧力分布センサが、それぞれ口蓋、舌、触覚受容器に相当する人工咀嚼と位置づけられる。

【食感推定モデル作成】 Fig.3(c)に示すように、圧力分布から官能評価値を推定する数理モデルを作成する。はじめに、画像解析処理を介して、圧力分布の P の特徴量を算出する。続いて、特徴量を説明変数、官能評価値 n を目的変数とした回帰モデルを作成し、食感推定式 $\hat{n} = f(P)$ を導出する。

以上の手順で獲得した食感推定式により、ペースト食圧縮時の圧力分布 P から食感官能評価値を推定できる。

すなわち、ヒトに代わる人工咀嚼によって、ペースト食の食感を評価することができる。

4. 実験

4.1 試験ペースト食と実験システム

試験ペースト食として5種類の市販ペースト食を使用し、Visual analog scale 法²⁾に基づく官能試験を実施して、「凝集感（定義：口腔内でのまとまりやすさの印象）」の官能評価値を取得する。なお、官能評価値は0~100の整数値として与えられる。今回、試験員8名（平均年齢30.4歳）で官能試験を実施し、平均値を官能評価値（Value of Sensory Evaluation: VoSE） n とする。便宜上、各ペースト食に対し、 n の小さいものから順にペースト食A~Eと名付ける（Table 1）。

Table 1 Value of sensory evaluation (VoSE) of tested paste food

Paste	A	B	C	D	E
VoSE:	28.9	33.6	40.0	50.4	62.5

Fig.4に、シリコン製の弾性模擬舌を導入した圧縮試験装置を示す。なお、模擬舌の弾性率は46[kPa]であり、ヒトの舌弾性率³⁾に準拠して設定している。圧縮プレート表面には、圧力分布センサ（ニッタ株式会社製：測定範囲44×44[mm]、空間分解能1[mm]、時間分解能10[ms]、圧力分解能0.2[kPa]）が装着されている。今回の圧縮試験は、以下の手順で行う。ペースト食をシリンジで0.3[ml]を計量し、模擬舌上の中央部に設置する。初期状態（ $t=0$ [s]）として、圧縮プレートを模擬舌表面から0.5[mm]の高さに位置させる。圧縮プレートを下降速度20[mm/s]で降下させ、模擬舌表面から0.5[mm]の高さで停止させる（ $0 < t \leq 0.225$ [s]）。その後、静止状態を維持する

（ $0.225 < t \leq 5.0$ [s]）。一連の過程の圧力分布を、平面内座標（ x, y ）における圧力値 P の時系列データ $P(x, y, t)$ として記録する。なお、プレート下降速度はヒトの舌の平均動作速度⁴⁾に基づく。

4.2 圧力分布データに基づく食感評価

Fig.5に、それぞれペースト食A~Eの圧力分布データを示す。ただし、定常状態とみなすことのできる $t=2.5$ [s]での測定データであり、同図において、上段は圧力分布画像、下段は x - P 面への射影図である。Fig.5(a)に示すように、ペースト食の「凝集感」官能評価値 n が小さいほど、圧力検出箇所は広範囲に散在し、全体的に圧力値は低い。逆に、Fig.5(e)に示すように、 n が大きいほど、圧力検出箇所は中央部に密集し、全体的に圧力値は高い。Fig.5から、 n が大きくなるほど、圧力検出箇所は中央部に密集し、全体的に圧力値は高くなるという傾向が観察できる。この傾向はFig.2(a), (b)で示した基本原理と合致し、圧力分布データが含む幾何学的情報と力学的情報が「凝集感」官能評価値と強い相関を有することが期待できる。

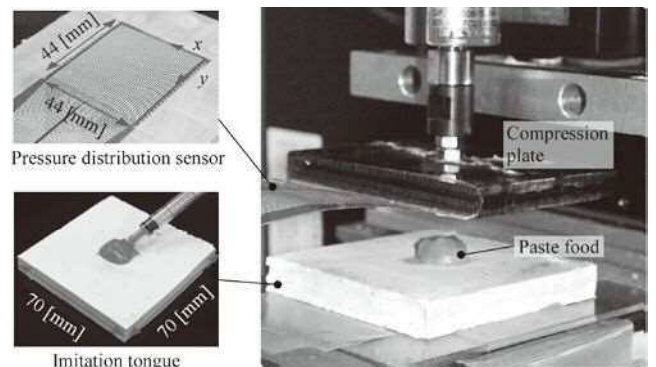


Fig. 4: Experimental setup

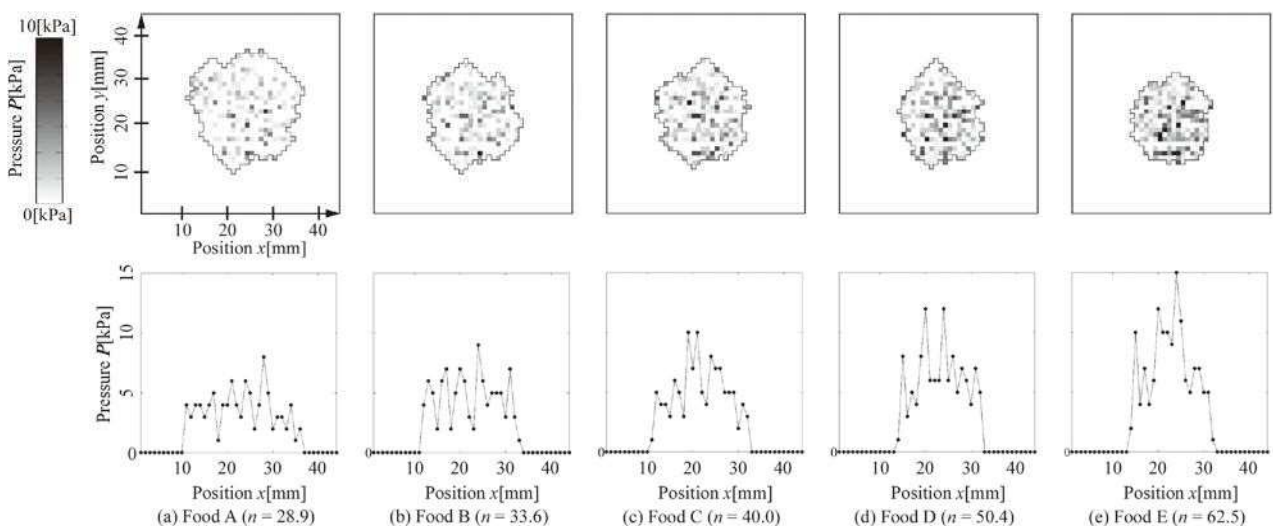


Fig. 5: Pressure distributions of different kinds of paste food

圧力分布データの特徴量を算出し、「凝集感」官能評価値の推定モデルを作成する。ペースト食A～Eのいずれの場合も、 $2.5 \leq t \leq 5.0$ [s]で定常状態が確認された。今回は定常状態の圧力分布のみに着目するものとし、同時帯での圧力分布の時間平均 $P_{st}(x, y)$ から食感評価のための特徴量を算出する。Fig.5における議論を踏まえ、以下の3つの特徴量を候補とする。

圧力分布の包絡面積：圧力分布の幾何学的情報として、空間的な広がりに着目する。ここで、Fig.5の圧力分布画像に示すように、圧力が検出されない箇所が存在するため、圧力分布の包絡面積を特徴量として算出する。ここでは、圧力分布を二値化して膨張と収縮を組み合わせるモルフォロジー処理⁵⁾を適用し、ペースト食の存在推定データ $Q(x, y)$ を算出する。ただし、座標 (x, y) にペースト食が存在する場合 $Q(x, y) = 1$ 、存在しない場合 $Q(x, y) = 0$ とする。このデータについて、次式により、包絡面積 A_{st} を得る。

$$A_{st} = \sum_x \sum_y Q(x, y) \quad (1)$$

なお、Fig.5の圧力分布画像に包絡線を描いている。

圧力分布の総和(反力)：圧力分布の力学的情報に着目し、圧力分布センサがペースト食全体から受けている反力 F_{st} を次式で算出する。

$$F_{st} = \sum_x \sum_y P_{st}(x, y) \quad (2)$$

圧力分布の総和(反力)：圧力分布の幾何学的情報と力学的情報の両者を考慮し、圧力分布センサがペースト食から受けている圧力の空間平均 \bar{P}_{st} を次式で算出する。

$$\bar{P}_{st} = \frac{F_{st}}{A_{st}} \quad (3)$$

Fig.6(a)に、圧力分布の包絡面積 A_{st} 、総和 F_{st} 、空間平均 \bar{P}_{st} と「凝集感」官能評価値 n との相関関係を示す。ただし、模擬舌をベースとし、ペースト食A～Eについてそれぞれ7回の圧縮試験を行った際の圧力分布データを用いている。Fig.6(a-i)に示すように包絡面積 A_{st} とは負の、Fig.6(a-ii)に示すように総和 F_{st} とは正の強い相関が確認できる。ここで留意されたいのは、「凝集感」が小さく薄く広がるペースト食においても十分な反力が算出されている点である。これは、模擬舌がペースト食を保持する作用による出力

増強効果と位置づけられる。最も相関係数が大きいのは、Fig.6(a-iii)に示す空間平均 \bar{P}_{st} である。これに対して、Fig.6(b)に、剛体ベースを用いた場合の圧力分布データから算出した特徴量と「凝集感」官能評価値 n の相関関係を示す。剛体ベースの場合、Fig.6(b-i)に示すように、包絡面積と「凝集感」との相関が特に弱い。さらに、Fig.6(b-ii)に示すように、「凝集感」が小さい($n < 40$)ペースト食については、薄く広がり過ぎることで反力を適切に検出できなくなってしまうこともわかる。結果として、Fig.6(b-iii)に示すように、剛体ベースでも空間平均 \bar{P}_{st} と「凝集感」との相関係数は大きい。Fig.6(a-iii)の模擬舌の場合と比較すると、 \bar{P}_{st} のばらつきが大きく、また、 $n \leq 40$ の範囲で不正な分布となっている。これは、とりわけ「凝集感」が小さいペースト食を評価できないことを意味している。

以上を踏まえ、圧力分布の空間平均 \bar{P}_{st} を特徴量として「凝集感」官能評価値 n との線形単回帰モデルを作成し、 n の推定式を導出する。Fig.7(a), (b)に、それぞれ模擬舌を用いた場合および剛体ベースを用いた場合について、「凝集感」官能評価値 n と推定値 \hat{n} の関係を示す。ただし、Leave-one-out交差検証⁶⁾を行っている。Fig.7(a)より、模擬舌を用いて圧力分布を測定することで、定常状態における圧力分布の空間平均から「凝集感」官能評価値 n を高精度で評価できることが確認できる。

5. まとめ

本研究では、弾性体を用いたペースト状対象物のセンシング問題について考察し、ペースト食の食感評価システムを構築した。弾性模擬舌による凝集性抽出効果を明らかにし、ペースト食の凝集性を圧力分布測定により定量化する手法を提案した。圧力分布特徴量を用いて、ヒトの「凝集感」を高精度で推定できることを示した。今後は、食感評価のバリエーションを拡大するために、過渡応答解析や画像テクスチャ解析を導入する予定である。

6. 参考文献

- 1) T. Funami: Next Target for Food Hydrocolloid Studies: Texture Design of Foods Using Hydrocolloid Technology, Food Hydrocolloids, vol.25, pp.1904-1914, 2011.
- 2) 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.

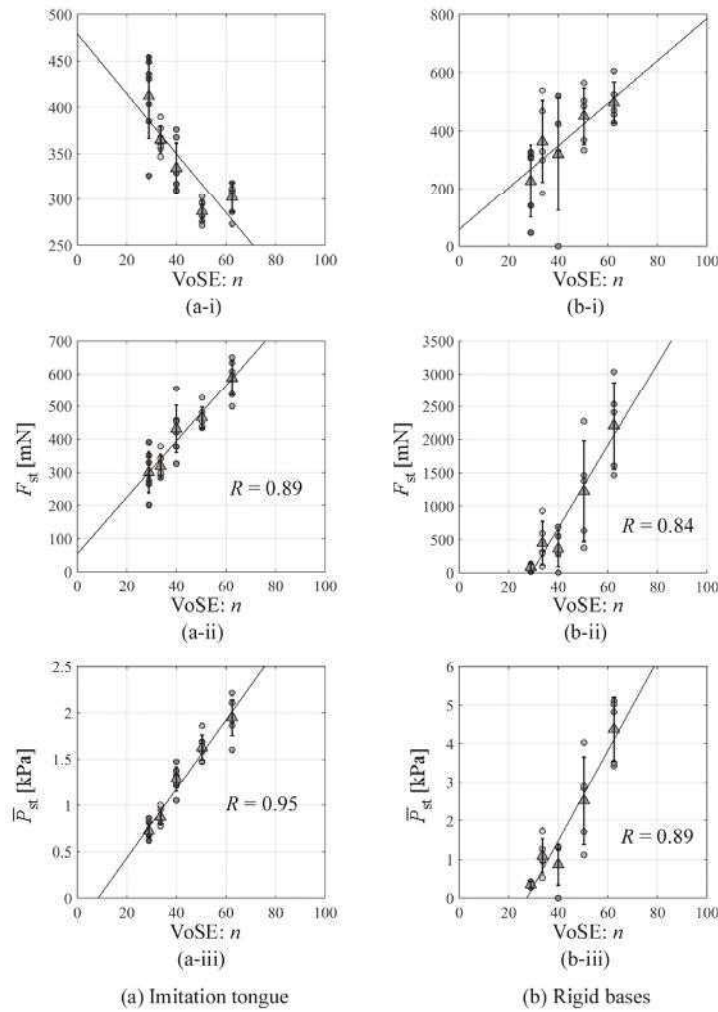


Fig. 6: Relationship between the feature values and the value of sensory evaluation (VoSE)

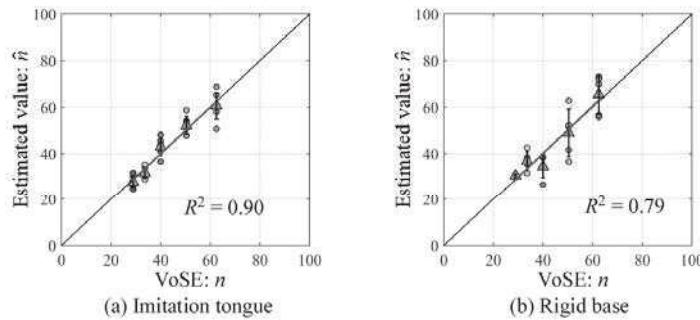


Fig. 7: Result of estimation

- 3) 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 (CME2012), 511/516, 2012.
- 4) C.L. Peng, P.G. Jost-Brinkmann, R.R. Miethke, and C.T. Lin: Ultrasonographic Measurement of Tongue Movement During Swallowing, J Ultrasound Med, 19, 15/20, 2000
- 5) 田村秀行: コンピュータ画像処理, オーム社, 2002.
- 6) S. Arlot: A Survey of Cross-Validation Procedures for Model Selection, Statistics Surveys, 4, 40/79, 2010.



勤務先: 株式会社 小松製作所
 業務内容: 溶接課の業務を経験した後、生産技術職として製品の生産工程の改善に従事する予定。