S0520205

クリープメータによる液状食品の粘性特性測定法に関する研究

下笠 賢二^{*1}, 水沼 博^{*2}

Study on the measurement method of viscous property of liquid foods using a creepmeter

Kenji SHIMOKASA^{*1} and Hiroshi MIZUNUMA^{*2}^{*1} Tsukuba Univ. of Technology Dept. of Industrial Information
4-3-15 Amakubo, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-8520 Japan

Swallowing disorder has been becoming a serious issue with increasing in elderly people, because pneumonia caused by aspiration is often the death of the aged. An increase in liquid food viscosity is effective to protect the aspiration, and thus a lot of thickener additives are used to raise the viscosity of drinks or liquid care foods. Our purpose is to investigate what kind of rheological characteristics of the viscous liquid give a good swallowing feel in a throat. Therefore, we numerically analyzed the liquid squeezing flow in the container of the creepmeter. As a rheological model, a power-law model was applied to the simulation of the liquid food flow. The motions of a throat and the plunger in the creepmeter were simulated using a moving grid method. In the creepmeter, the plunger thrust was computed, and the results qualitatively agreed with the measurements for liquid foods. Rheological studies on the squeezing flow in the creepmeter are expected to enable the rheological prediction of a swallowing feel in a throat for the liquid foods.

Key Words : Texture property, Computational Fluid Dynamics, Rheology, Liquid foods

1. 結 言

現在、高齢者を中心に嚥下機能が低下した嚥下障害者、及び嚥下困難者が増加している。嚥下障害とは、口腔から摂食した食品が誤って気管へ入ってしまう現象が恒常的に生じる状態である。誤嚥は窒息の危険性を伴う上、誤嚥性肺炎の原因にもなる。肺炎は日本人の死亡原因の第三位となっており、誤嚥性肺炎は高齢者の死亡原因の肺炎の中でも潜在的に多く含まれる深刻な問題である⁽¹⁾。誤嚥を防ぐために粘度を調整（増粘）した介護食が利用されているが、安全基準を確立することは重要であり、それに準拠した高品質の介護食の開発が必要である。食品はテクスチャ特性として定義される硬さ、付着性、凝集性、咀嚼性、ガム性、粘性などの様々な特性を持っており、多くの食品メーカーや研究者が液状食品の評価にクリープメータと呼ばれる一軸圧縮試験法でテクスチャ特性を定量化している。硬さパラメータは圧縮時のスラストの最大値として定義され、テクスチャ特性の中でも最も重要なパラメータとして位置付けられているが、クリープメータは付着性や凝集性などその他のパラメータも同時に得ることが可能である。また、クリープメータは口腔内での咀嚼を模擬した機構となっているため、食感の心理的特性量を与える点で優れている。多くの食品は非ニュートン粘性を示すため、ずり速度の変化によるみかけの粘度の把握が重要である。丸山ら⁽²⁾はゾル状食品の飲み込み特性を粘性特性やクリープメータで測定される硬さから予測する方法を提案している。一方、クリープメータは、本来固形食品を対象に開発されているため、液状食品に使用すると粘度によっては本来測定すべき物性と無関係な物理量（浮力など）が支配的になる場合もあり、測定結果の解釈を困難にしている。介護の現場で実用的にテクスチャ測定結果を活用するためにはクリープメータでの液状食品の流れを把握することが重要である。そこで、テクスチャ測定において生ずる流れの数値計算を行い、液状食品の硬さパラメータに着目し、レオロジー特性の関係を明らかにすることを本研究の目的とした。

^{*1} 正員、筑波技術大学（〒305-8520 茨城県つくば市天久保 4-3-15）

^{*2} 正員、首都大学東京大学院 理工学研究科
E-mail: simokasa@a.tsukuba-tec.ac.jp

2. 実験方法

2・1 テクスチャ測定実験

テクスチャ測定実験にはクリープメータ(RE-33005: 山電(株))を使用した。コンテナが速度 $U(t)$ で上昇し、コンテナに充填された流体をプランジャが圧縮する動作をモデル化した断面図を図1に示す。プランジャは半径 $a=20$ mm の円筒型とし、試料を充填するコンテナの半径 $b=27$ mm とした。コンテナ内の試料の初期高さ $l(0)=15$ mm であり、その後 5.7 mm の圧縮の設定で、コンテナが最下点から垂直に上昇する。本実験では、試料にニュートン流体としてグリセリン、非ニュートン流体としてヨーグルト及び、澱粉系増粘剤水溶液(ムースアップ)を使用した。ヨーグルトは介護の現場では、飲み込み易く誤嚥しにくい代表的な食品の一つとされている。ムースアップは誤嚥の可能性が高い低粘度の液状食品の粘度を調整可能な増粘剤である。本実験では水と混ぜてムースアップ水溶液とした。粘性特性の測定には回転粘度計(RS600, HAKKE)を使用した。測定で得られた流動曲線からヨーグルト(明治ブルガリアヨーグルト無糖)の粘性特性は指数則と仮定し、モデル定数(K, n)を決定した。その結果、グリセリン(密度 $\rho=1264$ kg/m³, 粘度 $\mu=1.766$ Pa·s, 表面張力 $\sigma=0.063$ N/m), ヨーグルト($\rho=1130$ kg/m³, $K=3.31$ Pa·s ^{n} , $n=0.335$, $\sigma=0.053$ N/m), ムースアップ 7.4% 水溶液($\rho=996$ kg/m³, $K=45.4$ Pa·s ^{n} , $n=0.308$, $\sigma=0.072$ N/m) となった。

Fig.1 Schematic cross-section model of the creepmeter in a cylindrical coordinate system

Fig.2 Mesh system for flow simulation of creepmeter in a cylindrical symmetric coordinate system

2・2 数値計算

クリープメータでの流れを明らかにするために、数値計算によりテクスチャ測定の検証を行った。計算には、熱流体解析の汎用コード CFD2000/Storm (ADAPTIVE RESEARCH) を使用した。気液二相流の計算には VOF (Volume of Fluid) 法、界面に働く液体の表面張力は Blackbill の連続表面力(CSF)モデルを用いた。VOF 解析は気液二層流の界面の計算を行うために体積分率(VFRC)を計算することで通常の質量、運動量、およびエネルギー保存方程式に対する付加的な対流項を解くための手法である。VOF 法は、任意の計算セルの流体密度は二つの流体密度の線形結合式によって表されると仮定している。計算の中でクリープメータのプランジャの動作を再現するために、計算格子がプランジャの動きとともに時間的に移動する移動格子を用いた。実機はコンテナ側が上昇する機構であるが、接触面はプランジャと容器内の試料との相対関係であり、移動速度も低く慣性力の影響も無視できるため、数値計算ではプランジャ領域が下方方向に動くプログラムとした。また、クーラン条件を満たすと共に、解の収束の安定化を図るために、計算時間間隔 $\Delta t=5.0 \times 10^{-6}$ s とした。座標系は r - z 円筒座標系の軸対称流れとし、離散化のための計算格子は精度が高い構造格子を使用し、サイズは移動格子による変形を考慮し、初期状態の液体部は 64×12 セル、気体部は 30×7 セルに分割した。プランジャ部分は剛体とし、計算対象外とした。プランジャとコンテナの空間を離散化した計算格子を図2に示す。すべての壁面はすべりなしとし、粘性モデルは指数則モデルを使用した。本研究で使用した試料のプランジャ底面から側面付近での Re 数は $56 \sim 107$ 程度の範囲と見積もられるため、流れは層流とした。計算結果からプランジャ底面に作用する法線応力、及び側面に作用するせん断応力を計算した。

3. テクスチャ特性の測定結果

3.1 数値計算結果

グリセリンの数値計算結果を図3に示す。(a)はプランジャ移動直後の0.01s, (b)は硬さ Ha が最大となった0.5s後のVOF値の分布を示している。計算前は平らな液面(a)が, プランジャに押込まれることにより, 液面は(b)のように盛り上がる。プランジャ側面ではプランジャ移動に伴うクエット流れとポアズイユ流れの複合的な流れとなる。なお, 0.8sまでの界面形状, 及び流動に関するVOFの結果では, ニュートン流体であるグリセリンと非ニュートン流体であるヨーグルト, ムースアップとの間に顕著な差異は見られなかった。数値計算結果から得られたスラストの最大値に相当する数値計算の硬さパラメータ Ha_{sim} は, グリセリン0.28N, ヨーグルト0.46N, ムースアップ3.52Nとなった。

Fig.3 Contour maps of VOF in the container of the creepmeter

3.2 測定実験結果

クリープメータによるテクスチャ特性のグリセリンの測定結果に数値計算結果を加えたものを図4(a)に, 同様にヨーグルト, ムースアップの測定結果を(b), (c)に示す。プランジャに作用するスラスト F (第1軸)の実測値(Experiment), 数値計算の結果(Simulation), 近似理論計算の結果(Theoretical)をプランジャ速度(第2軸)と共に図示している。実測値の硬さパラメータ Ha_{exp} はテクスチャカーブの最大高さとして定義される値であり, グリセリン, ヨーグルト, ムースアップのすべてプランジャが試料を押込んだ最下点0.7sではなく, その手前の減速点0.5sで発生し, グリセリン0.28N, ヨーグルト0.5N, ムースアップ3.1Nとなった。

Fig.4 Texture curves of simulation and experiment for glycerin, yogurt and mousse-up

4. 結 語

本研究では、食品のテクスチャ特性の評価に広く使用されているクリープメータを液状食品に適用し、CFD による数値計算を行った。指数則モデルを用いた数値解析の結果は定性的には実測値と一致し、硬さに対応するプランジャのスラスト最大値は定量的に一致した。今後、咀嚼時のずり速度などを考慮した最適な測定条件を明らかにしていく予定である。

文 献

- (1) 厚生労働省大臣官房統計情報部, 人口動態調査, (2011)
- (2) 丸山, 高橋, 渡辺, 大越, 栄養学雑誌, 58-1 (2000), 23-28