

## 圧縮試験による液状食品粘性特性の推定と適切な測定条件に関する検討

### Study on the estimate of liquid foods viscous characteristics using a compression test and appropriate measurement condition

○下笠 賢二, 水沼 博

Kenji SHIMOKASA Tsukuba University of Technology  
Hiroshi MIZUNUMA Tokyo Metropolitan University

**Abstract:** 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 prevent the aspiration. Our purpose of this study is to investigate the estimate of liquid foods viscous characteristics using a compression test and appropriate measurement condition. Therefore, we theoretically calculated the liquid squeezing flow in the container of a compression test. As a rheological model, a power-law model was applied to the liquid food flow. The thrust on the bottom of plunger was calculated, and the results qualitatively agreed with the measurements for liquid foods. However, in the case of low viscosity, the influence of buoyancy and pressure drop was not negligible. Rheological studies using a compression test are expected to enable the rheological prediction of a swallowing feel in a throat for the liquid foods.

**Key Words:** Viscous characteristics, Approximate theoretical analysis, Rheology, Liquid foods

#### 1. 緒言

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. 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おり, 安全基準を確立することは重要である. 食品はテクスチャ特性として定義される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クリープメータと呼ばれる単軸圧縮試験法で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. 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. 一方, クリープメータは, 固形食品, 及び半固形食品を測定対象としているため, 低粘度の液状食品は本来測定すべき物性と無関係であるべき浮力などの物理量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. テクスチャ測定結果を正しく活用するためには測定時のプランジャ底面及び側面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をモデル化することにより, 近似理論計算を行う. 液状食品の硬さパラメータに着目し, 測定条件が流れに及ぼす影響を調べることにより適切な測定条件を明らかにするとともに, 非ニュートン粘性特性の推定を行うことを本研究の目的とした.

#### 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), JSV-H1000:日本計測システム(株))を使用した. コンテナに充填された流体をプランジャ速度  $u(t)$  で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  $a=20\text{mm}$  の円筒型, 試料を充填するコンテナの半径  $b=27\text{mm}$ ,  $5.7\text{mm}$  圧縮とした. 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. 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), 澱粉系増粘剤(ムースアップ)の粘性特性は指数則  $\tau = K\dot{\gamma}^n$  と仮定し, モデル定数( $K, n$ )を推定した.

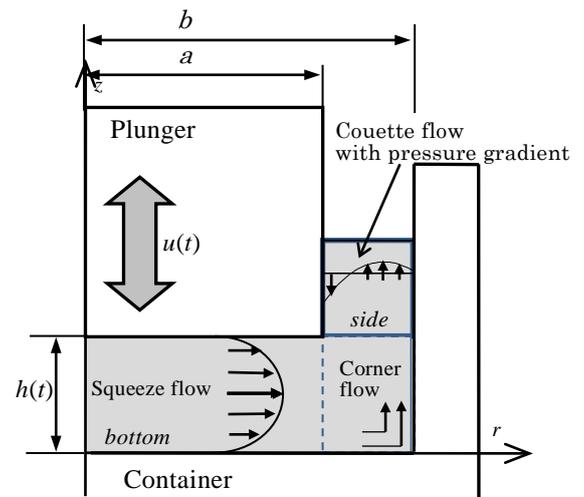


Fig.1 Schematic flow pattern between plunger and container in a cylindrical coordinate system

##### 2-2 近似理論計算

多くの液状食品は非ニュートン粘性を示すことから, 圧縮時にプランジャに作用するスラストを求めるためのレオロジーモデルとして指数則モデルを用いた. プランジャ底面の流れは図1に示すように平行円板間のスクイーズ流れとして軸対称に外周方向へと流れることにより静圧が底面を押し上げる力  $D_1$  が発生する. 軸方向の流れは外周方向に対して微小であると仮定した. 側面はプランジャの移動によるケット流れとポアズイユ流れの複合的な流れとした. また, 隅部に対しては, 非ニュートン流体の曲がり管内流れにおける管摩擦係数をもとにした損失係数<sup>(1)</sup>を軸対称モデルとして適用し, 平行板プラストメータ流れの理論<sup>(2)</sup>より式を導いた. その結果, プランジャの軸方向に作用するスラスト  $F$  は,  $D_1$ , 浮力  $B_0$ , 側面のせん断力  $D_2$ , 隅部

の損失  $Pe$ , 隅部の運動エネルギーの変化による損失  $Ee$  の5成分の総和となりプランジャ底面と側面の流れに起因する粘性力として式(1)に示す変数により決定される。

$$F = f(n, K, u, h) = D_1 + D_2 + B_0 + P_e + E_e \quad \dots(1)$$

次に, クリープメータの測定結果から粘性特性のモデル定数 ( $K, n$ ) を推定するために, プランジャ速度  $u(t)$  は一定とし, 圧縮に伴う底面のクリアランスの変化によるずり速度 ( $0.8 \sim 200 \text{s}^{-1}$ ) とずり応力の関係からモデル定数を推定した。

### 3. 実験結果

クリープメータによるテクスチャ特性のヨーグルトの測定結果に近似理論結果を加え, プランジャに作用するスラスト  $F$  (第1軸) の実測値 (Experiment), 近似理論計算の結果 (Theoretical) をプランジャ速度 (第2軸) と共に図示したグラフを図2に示す。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値として定義される値であり, 圧縮最下点  $0.7 \text{s}$  ではなく, プランジャ速度減速点  $0.5 \text{s}$  で発生し, 近似理論  $Ha_{the}$  と一致した。各成分は, 底面の抗力  $D_1$  が59%で最も高く, 浮力  $B_0$  は28%, 側面のせん断応力  $D_2$  は8%となり, 隅部の圧力損失  $Pe$  とエネルギーの変化による損失  $Ee$  の和は5%となった。低粘度のグリセリンと比較すると底面の抗力が支配的であり, 相対的に浮力の影響は小さくなるが, 側面や損失の影響を考慮する必要性が明らかとなった。また, モデル定数の推定については,  $n$  が2%の誤差に対してずり速度 ( $0.8 \sim 200 \text{s}^{-1}$ ) の時のみかけの粘度  $K$  は2~20%程度の差異が生じた。

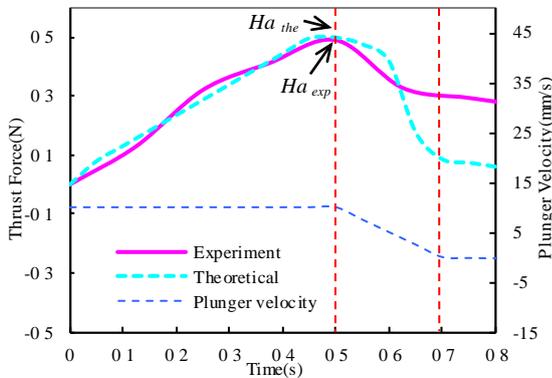


Fig.2 Texture curves for yogurt (experiment and theoretical value)

### 4. 考察

液状食品のテクスチャ特性のパラメータとして最も重要である硬さ  $Ha$  の近似理論  $Ha_{the}$  と実測結果は一致していることから, 硬さに関しては近似理論により推定が可能であることが示唆された。しかしながら, 低粘度の場合, 相対的に浮力の比率が顕著に高くなる。本来, 浮力は硬さの食感とは物理的には関係がないため, 浮力の寄与が相対的に低くなるような条件で測定を行うことが理想的である。よって浮力の影響を最小限に抑えるためには圧縮深さを減らすのが望ましい。低粘度のグリセリンは粘性による圧力損失と角部の損失が1.3%と微小であるが, 高粘度のヨーグルトや増粘剤では無視できない。クリープメータは単軸の圧縮試験であるため, スラストはプランジャ底面の抗力のみ

で決定されるのが理想的である。そこで, 指数則流体の側面のクリアランスの影響を図3に示す。試料は本研究で使用したプランジャ半径  $20 \text{mm}$  のヨーグルトの結果において, プランジャとコンテナとの側面のクリアランスを変化させた場合のスラストに占める各成分を示す。ヨーグルトのプランジャ半径  $20 \text{mm}$ , クリアランス  $7 \text{mm}$  とした場合, 隅部の損失  $Pe$ ,  $Ee$  がスラストの5%を占めている。この影響を3%程度に抑えるためにはクリアランス  $9 \text{mm}$ , 1%では  $15 \text{mm}$  となるがこの結果から得られる。損失に関しては, 軸対称の曲がり管としてモデル化しており, 精度向上のためには, 損失を見積もるためのモデル化の検討が必要となるが, 厳密には諸条件によって変化するため損失の影響が最小となるような条件とすることが望ましい。側面のクリアランスとプランジャ半径を大きくし, 圧縮量を減少することで, 損失の最小化, 及び底面の抗力成分の最大化と同時に浮力の影響を最小化することが可能である。また, これまで回転粘度計でしか得ることができなかった粘性特性をクリープメータから得ることの利点は大きい。回転粘度計がクリアランス一定で回転速度を変化させることでずり速度を変化させるのに対し, クリープメータは圧縮によるクリアランスの変化によりずり速度を変化させているため,  $K$  の差異の要因の一つは時間依存性によるものと考えられる。口腔内の流れは後者に近いことから, 食感により正しく対応した粘性特性を得ることが可能である。

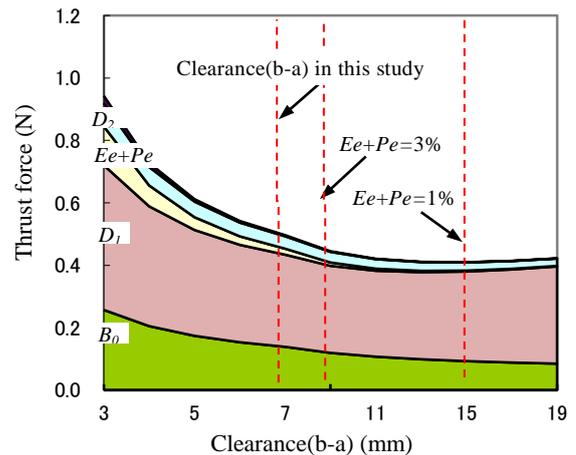


Fig.3 Effect of the clearance in the region between plunger and container for viscous power-law fluid (yogurt)

### 5. 結言

指数則モデルを用いた近似理論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。近似理論解析の結果から浮力や隅部の損失の影響があることが明らかとなった。そしてその値はプランジャとコンテナとの側面のクリアランスに依存するため適切な測定条件を明確にすることが重要である。そして, 適切な条件で測定を行えば指数則の粘性モデル定数 ( $K, n$ ) の推定が可能であることが明らかとなった。

### 参考文献

- (1) 高見敏弘, 須藤浩三, 富田幸雄, 非ニュートン流体の曲り管内流れ (第一報, べき乗則流体の数値解析), 日本機械学会論文集 (B編) 52巻475号 (昭61-3)
- (2) 高分子学会 レオロジー委員会編, レオロジー測定法, (1965), 111-119