

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350087

研究課題名(和文)嚥下状態にある液体食品の粘度を予測する簡易測定器による迅速評価システムの構築

研究課題名(英文) Formulation of prompt evaluation system with a simple instrument for predicting viscosity of liquid foods under swallowing condition

研究代表者

吉田 雅典 (YOSHIDA, Masanori)

室蘭工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：70282994

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、嚥下状態にある液体食品の粘度(とろみ)を予測するために適当な粘度計、すなわち、構造が簡単で、取扱いが容易な簡易型の、迅速性をもつ測定器の開発と評価システムの構築を目的とした。嚥下挙動を模擬するべく溝型流路を操作や構造の点で修正した測定器を考案し、測定器における液の流れを流体力学的方法で解析した。流動実験にはニュートン性および非ニュートン性の試験液を用いた。本測定器に特有の粘性評価法を検討し、摩擦係数とレイノルズ数の関係に基づく概念を提示した。併せて、流れに及ぼす諸条件の影響を液体食品の嚥下プロセスとの関連において明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Objectives of this work were to develop a viscometer suitable for predicting the viscosity (thickness) of liquid foods under the swallowing condition and to formulate the evaluation system. The designed viscometer is for a structurally simple and easy-to-use instrument with promptness. A flow channel instrument was devised to simulate the swallowing behavior, being modified operationally and structurally, and the liquid flow in the instrument was analyzed in a hydraulic manner. For the flow experiments, Newtonian and non-Newtonian test liquids were employed. A methodology to evaluate the viscosity was discussed specifically for this instrument and then a concept was proposed based on the relation between the friction coefficient and characteristic flow length. Additionally, the effects of operational and geometrical conditions on the flow were revealed in consideration of the process swallowing liquid foods.

研究分野：化学機械，流体力学

キーワード：食品 嚥下 非ニュートン粘性

## 1. 研究開始当初の背景

病気や高齢による嚥下困難者の誤嚥を防止するために、液体食品の粘性を増粘剤により増加させる方法が広く採られている。増粘剤を溶解した液体食品の粘性は増粘剤の濃度や取扱時の温度だけでなく、含有成分、保存時間、調製方法などによっても異なることが経験的に知られている。看護や介護の場において嚥下困難者に、適当な粘性をもつ液体食品を提供するには現場での粘性の評価が不可欠であり、そのための測定はできるかぎり迅速に行う必要がある。多くの液体食品は非ニュートン粘性を示すので、粘度は、それがおかれる状態、ここでは嚥下状態に対して決定することが合理的である。本来であれば、剪断速度を任意に設定できる機能をもつ回転粘度計を用いるべきであるが、看護や介護の従事者が粘性を主たる専門としないことを考慮すると、回転粘度計に比べて構造が簡単で取扱いが容易な簡易型の、迅速性をもつ測定器の開発と評価システムの構築が望まれる。

現在食品その他の分野で提案されている簡易型粘度計はいずれも、簡単な構造の測定器において試料を、それに作用する重力を推進力として流動させ、例えば経過時間に対して流動長さのみを測定して比較的迅速に粘性を評価するものであり、看護や介護の場における利用が期待される。嚥下に関する器官の形状や嚥下プロセスの実行を観察すると、口腔から食道までの流路が特徴的であることに加え、複雑な嚥下プロセスにおかれた状態に相当する剪断速度を一意に決められないことが考慮すべき事項として取り上げられる。すなわち、嚥下状態にある液体食品の粘度を、簡易型粘度計を用いて予測するためには、実際の流路を加味した流路の思案と剪断速度に関する検討により、従来の測定器を修正した、新しい測定器をまず開発する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究では、嚥下状態にある液体食品の粘度を予測するための簡易型粘度計の設計に向けて、構造が簡単で、取扱いが容易な簡易型の、迅速性をもつ粘性測定器の開発を第一の目的に、口腔から食道までの流路と、嚥下プロセスにおかれた状態に相当する剪断速度を考慮して修正した溝型流路測定器を試作した。ニュートン性および非ニュートン性の試験液についての測定器における流れの実験的な解析を通して、粘性を評価するための測定器としての利用に必要な基礎データを取得、加えて本測定器に特有の粘性評価法を検討し、第二の目的としての評価システムの構築を試みた。

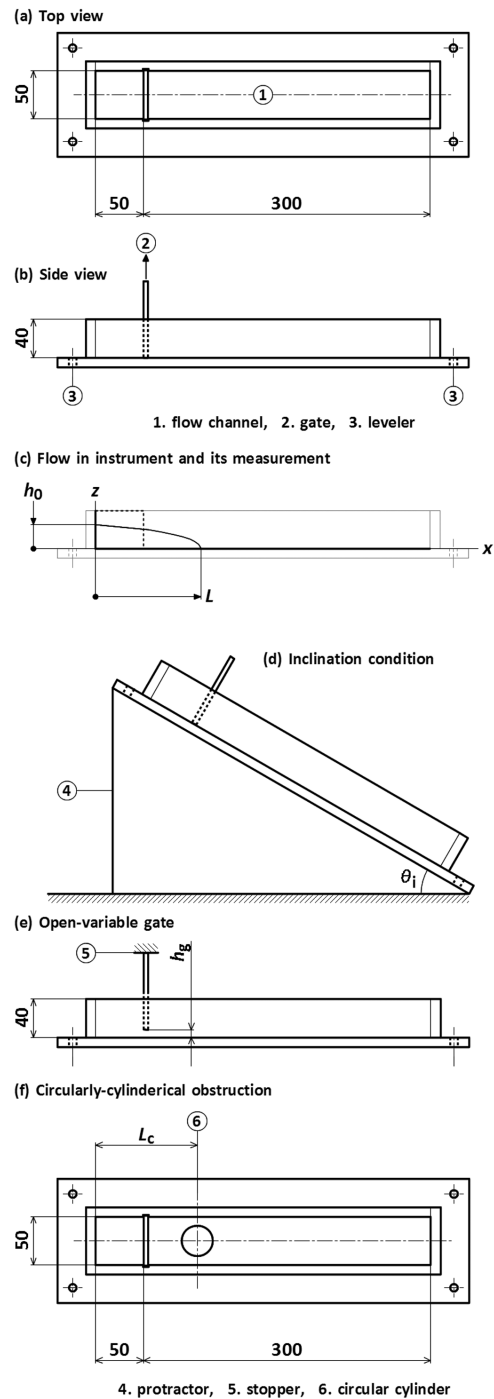


Figure 1: Design and operation of flow channel instrument.

## 3. 研究の方法

嚥下プロセスでは、口腔から送られた食塊は、中咽頭にある喉頭蓋により誘導され、喉頭蓋の両側を通して食道へ達する。口腔から食道までをひとつの流路とみなすならば、喉頭蓋は、流れを制御する弁であり、流れに対する障害物であると考えられる。このような流れを模擬するために流路に弁を取り入れ、流路に障害物を設置することを思案した。操作が容易な溝型流路を用いて、流路における

ゲートの開度の調節により弁として機能させることで、ゲートを通る流れをつくる、流路に障害物としての円柱を置くことで円柱周りの流れをつくる、それぞれの系を、喉頭蓋を含む喉頭での流れのモデルとした。

ニュートン性の試験液としてグリセリンを用いた。非ニュートン性の試験液には嚙下補助用増粘剤水溶液を用い、場合によって NaCl を溶液に加えた。すべての液は 25 で取り扱い、レオロジー特性を決定した。液の粘性は、定常粘性測定による結果に Herschel-Bulkley モデルを適用して評価した。併せて、動的粘弾性測定を行い、液の弾性を弾性率で評価した。

モデルの基礎とした溝型流路をもつ測定器の概略を Fig. 1 に示す。流路の寸法は長さ 300 mm、高さ 40 mm、幅 50 mm である [ 図(a), (b) ]。測定器は、流路の傾斜角度  $\theta$  を 0 または 30° として設置した [ 図(d) ]。供試液は、端壁と、それから 50 mm の位置にあるゲートの間の区画を満たすように充填した。ゲートの開度  $h_g$  は 2 mm 開から 8 mm 開、全開まで変化させるとともに [ 図(e) ]、流路に障害物としての円柱（直径 32 mm）を置く場合には、円柱は、その断面円の中心が流路中央線上、端壁から 91-121 mm ( $L_c$ ) に位置するように取り付け [ 図(f) ]。ゲートを開けた後、任意の時間において液先端と端壁位置の間の距離（流動距離  $L$ ）を測定し、その時間変化として流動速度  $\Delta L/\Delta t$  を決定した。また、後壁位置での液高さ  $h_0$  を測定した [ 図(c) ]。

#### 4. 研究成果

ニュートン性試験液を用い、流路傾斜角度  $\theta$  が 0, 30° である場合について流動の距離  $L$  に対する速度  $\Delta L/\Delta t$  の変化を調べた。 $\Delta L/\Delta t$  が、ゲート開放直後の時間帯を除いて流動現象の進行とともに減少する傾向は 2 つの傾斜条件で共通であった。流動過程全体にわたって、 $\theta$  が 30° での  $\Delta L/\Delta t$  の値は 0° での値より大きかった。

前研究において、われわれは水平に設置した測定器内の液流れを解析した。流路の方向での力のつり合いから平均的な剪断応力  $\tau_{av}$  を、流動距離  $L$ 、後壁高さ  $h_0$ 、液密度  $\rho$  および重力加速度  $g$  を用いて次のように表した。

$$\tau_{av} = \frac{\rho g h_0^2}{2L} \quad (1)$$

傾斜させた測定器に対して  $\tau_{av}$  の式を、傾斜による高さの差に関する項を加えて拡張した。

$$\tau_{av} = \frac{\rho g h_0^2}{2L} + \frac{\rho q g \sin \theta}{L} \quad (2)$$

ここで  $q$  は流路幅あたりの液体積である。そして、代表剪断速度  $\dot{\gamma}_c$  は、液粘度  $\mu$  を用いて次式により定義された。

$$\dot{\gamma}_c = \frac{\tau_{av}}{\mu} \quad (3)$$

式(3)に基づき 2 つの傾斜条件について流動の距離  $L$  に対する剪断速度  $\dot{\gamma}_c$  の変化を調べた。 $\dot{\gamma}_c$  が流動過程で減少する傾向を共通して観測した。 $\dot{\gamma}_c$  値は、 $\theta$  を 0° から 30° へ増加させると約 10 倍のオーダーで大きくなった。 $\theta=30^\circ$  での初期の過程ではおおむね  $50 \text{ s}^{-1}$  の剪断速度が得られ、傾斜測定器は、嚙下プロセスを対象とした粘性評価への適用の必要条件を満たしていることを確かめた。

開度可変ゲートをもつ傾斜測定器における、開度  $h_g$  を変えた場合の流動過程を観察した。流速  $\Delta L/\Delta t$  は流動過程全体で流量制御により減少し、その影響は  $h_g$  の減少とともに大きくなった。ゲート開放直後の速度をゲート条件について比較すると 4 mm 開と全開の間の相違は約 10 倍であった。よって、そのような流量制御は、測定器での流速を変えることに対して有効であった。

円柱障害物をもつ傾斜測定器における、障害物位置  $L_0$  を変えた場合の流動過程を観察した。障害物があるときの流動現象は過程において異なった。円柱の中心線すなわちそれぞれの  $L_0$  の位置から上流（円柱領域）では障害物の有無の条件の間に流速  $\Delta L/\Delta t$  の相違はほとんど観られなかった。すなわち、円柱の前面での影響は小さいと評価した。流れが円柱の背面（後流領域）に達すると  $\Delta L/\Delta t$  は、障害物の有無で比較すると明らかに減少した。障害物の影響は円柱中心線から約 5 cm 下流で最大を示した。その位置は、それぞれの  $L_0$  で設置した円柱の周りを分流した後合流するところに対応する。そのような影響は  $L_0$  にほとんど依存しないことを認めた。

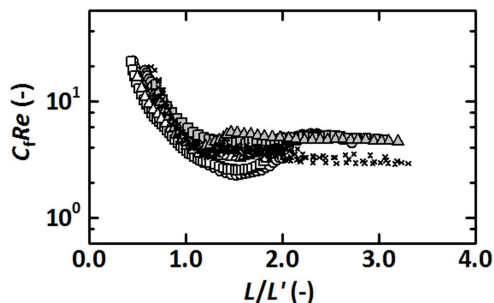
流路傾斜角度  $\theta$  が 30° である測定器をゲート全開、障害物なしの条件で用いた。ニュートン性および非ニュートン性の試験液について流動距離  $L$  に対する流動速度  $\Delta L/\Delta t$  の変化を調べた。すべての試験液で  $\Delta L/\Delta t$  はゲート開放直後に増加し、流動現象の進行とともに減少する傾向にあった。すべての液はそれぞれ最大速度をとったが、 $\Delta L/\Delta t$  が増加から減少へ移る挙動は液の間で異なった。この相違は粘弾性液の開始または発達流れの変化に類似すると思われる。よって、 $\Delta L/\Delta t$  の挙動は液のレオロジー特性を反映すると考えられる。以後の解析のために、流速が最大値を示す流動距離  $L'$  をそれぞれの液について決定した。

測定器内の液流れを水力学的方法で、慣例に倣って総括的に解析するため無次元パラメータを次のように定義した。

$$\text{摩擦係数: } C_f = \frac{\tau_{av}}{\rho \left( \frac{\Delta L}{\Delta t} \right)^2} \quad (4)$$

$$\text{Reynolds 数: } Re = \frac{\rho \left( \frac{\Delta L}{\Delta t} \right) h_0}{\eta} \quad (5)$$

ここで  $\eta$  は液粘度である。



Key	Thickener conc. (%)	NaCl conc. (%)
△	2.00	0.00
■	1.75	0.00
○	1.50	0.00
△	1.50	0.01
□	1.50	0.10
○	1.50	1.00
×	Glycerol	

Figure 2: Relationship between friction coefficient,  $C_f Re$ , and characteristic flow length,  $L/L'$ .

Fig. 2 は流動過程における摩擦係数と Reynolds 数の積、修正摩擦係数  $C_f Re$  のプロットを示す。横軸は、相対流動距離  $L/L'$  を用いて流動過程を表示するように目盛られている。ニュートン性試験液では  $C_f Re$  は流動開始直後に減少し、小さい行過ぎを経て、ある長さの流動の後ほぼ一定の値をとった。 $C_f Re$  が一定値をとることは流動抵抗に関して Stokes の法則を満たすことを示している。 $C_f Re$  が減少する初期の傾向はニュートン性と非ニュートン性の試験液で共通であったが、行過ぎに関する  $C_f Re$  の挙動は試験液の間で異なった。この相違は、 $C_f Re$  が粘性流れを表すパラメータであることを考えると液の粘弾性の相対的な大きさの相違に帰着される。すなわち、より高い弾性をもつ非ニュートン性液は当該の  $C_f Re$  をニュートン性液に比べてより高い値に保つ傾向にあった。後続の過程においては非ニュートン性液での  $C_f Re$  は徐々に減少してニュートン性液での値に近づいた。初期段階での流れに及ぼす弾性の影響は流速の急な変化に関係すると考えられる。そのとき、影響の程度の相違は液の粘弾性の相対的な大きさによる緩和現象の相違に起因するだろう。これらの結果は、液の弾性は顕著な速度変化の条件下で流れに影響を及ぼし、流れは、より高い弾性をもつ液でより大きく弱められることを明らかに

にした。

Fig. 2 に示したような  $C_f Re$  と  $L/L'$  の関係は溝型流路測定器による粘性評価に利用できる。液体食品のサンプルについて  $L'$  が既知であれば  $L/L'$  に対する  $C_f Re$  はニュートン性と非ニュートン性の試験液での結果に基づき変化する。ニュートン性液での  $C_f Re$  の値は粘性の程度を与える。非ニュートン性での範囲は弾性の影響の可能性を予測する。そのような評価を系統的に行うためには特性距離  $L'$  についてのさらなる実験と相関が必要である。

流動過程におけるゲートの影響を、流動開始直後に着目して摩擦係数  $C_f Re$  により評価した。いずれの試験液においても、開度を小さくすると摩擦係数は大きくなった。試験液による相違をみると、粘弾性液の弾性は開度によらず流れを抑制する傾向にあった。着目した流動開始直後は、流れが喉頭蓋で制御された後の食道入口に当たると考えられる。食道入口での流路は狭く、食塊が流れにくいので、嚥下困難者はそこで食塊を誤嚥する危険性がある。誤嚥防止のために液体食品を増粘する場合、食道入口では食塊が弾性によりさらに流れ難くなることを理解しておく必要がある。

流動過程における障害物の影響を、円柱領域と後流領域に着目して摩擦係数  $C_f Re$  により評価した。円柱領域での摩擦係数は粘性液に比べて粘弾性液で大きい。後流領域では強粘弾性液は粘性液に比べて大きい、弱粘弾性液は粘性液に比べて小さい摩擦係数を示す。誤嚥防止の観点から、円柱領域に相当する喉頭蓋で食塊をせき止め、後流領域に相当する食道内で食塊が円滑に流れることが好ましいと考えられる。喉頭蓋周りでは、弾性をもつ液体食品では摩擦係数が増加するため誤嚥防止の効果が期待できる。食道内では流動の促進に対して、弾性が弱い液が適していると判断される。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計 2 件)

M. Yoshida, H. Igarashi, K. Iwasaki, S. Fuse and A. Togashi, "Evaluation of Viscosity of Non-Newtonian Liquid Foods with a Flow Tube Instrument", *Int. J. Food Eng.* **11**, 815-823 (2015). 査読有

DOI: 10.1515/ijfe-2015-0138

M. Yoshida, H. Igarashi, K. Iwasaki, S. Fuse, Y. Tsuruta and T. Shimomura "Flow Analysis for a Flow Channel Instrument to Evaluate Viscosities of Non-Newtonian Viscoelastic Liquid Foods", *Int. J. Food Eng.*, in press. 査読有

〔学会発表〕(計 2 件)

五十嵐仁志, 岩崎研人, 吉田雅典, “溝型流路でゲート開度を変えて操作する測定器による液体食品の粘性評価” 2016 年度日本機械学会年次大会, 9/11-14, 福岡 (2016), G1700105 .

岩崎研人, 五十嵐仁志, 吉田雅典, “溝型流路に障害物をもつ測定器による液体食品の粘性評価” 2016 年度日本機械学会年次大会, 9/11-14, 福岡 (2016), G1700106 .

## 6 . 研究組織

- (1) 研究代表者  
吉田 雅典 (YOSHIDA, Masanori)  
室蘭工業大学・工学研究科・教授  
研究者番号 : 7 0 2 8 2 9 9 4
- (2) 連携研究者  
大平 勇一 (OHIRA, Yuichi)  
室蘭工業大学・工学研究科・教授  
研究者番号 : 0 0 2 5 0 5 2 2