

平成 21 年 5 月 15 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19500659

研究課題名（和文）液状食品用簡易溝型流路粘性測定器による迅速粘性評価システムの構築

研究課題名（英文）Construction of a System to Evaluate Viscosity Easily for Liquid Food Using a Simple Flow Channel Instrument

研究代表者

氏 名：吉田 雅典（YOSHIDA MASANORI）

所 属：新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号：70282994

研究成果の概要：溝型の流路をもつ測定器を簡易型粘度計に展開するために測定器におけるニュートン性および非ニュートン性の試験液の流れを実験的に解析した。本測定器による非ニュートン性液状食品の粘性評価について得られた知見をまとめると次のようになる：

- ・測定器における流れを層流として、 $1\text{ s}^{-1}$  以下のオーダーの剪断速度を測定できる。
- ・測定器における流れは摩擦係数とレイノルズ数の関係として整理され、その実験的關係は、液状食品の、物理的意味が明確な粘度を評価するのに有効である。
- ・容易な操作での本簡易型粘度計の使用法として特定の流動長さに対する経過時間の測定が推奨される。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：生活科学・食生活学

キーワード：食品と咀嚼性，粘性

## 1. 研究開始当初の背景

液状食品の品質を管理するにあたってその粘性は重要な項目のひとつである。また、粘性は生産プロセスにおける単位操作設計のための基礎データとして不可欠なものでもある。多くの液状食品は、剪断応力が速度勾配に対して線形関係を示さない、言い換えれば、粘度が剪断速度により変化する非ニュートン粘性を示す。具体的には、食事において咀嚼する速度や、プロセス配管において輸

送する速度を変えた場合に粘度は異なり、前者は食感の相違、後者は動力の相違といった結果になる。このような非ニュートン性液の粘性を物理的に厳密に評価するためには、变速機構と、力学的解析上限定された構造をもつ回転体型粘度計により測定した剪断応力と剪断速度の関係に基づく解析を行わなければならない。この方法は繰返し操作による長い時間を必要とすることから、液状食品を扱う生産、医療などの現場では、容易な操作

Table 1. Physical properties of liquids.

Solute	Conc. (%)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$k$ (Pa s <sup><i>n</i></sup> )	$n$ (-)	$\tau_0$ (Pa)
Glycerol	100	1.262	0.945	1	-
Jelly	85	1.358	1.29	1	-
Jelly	88	1.375	2.61	1	-
Jelly	91	1.394	7.51	1	-
Jelly	94	1.403	23.9	1	-
Xanthan	0.5	1.007	1.77	0.305	-
Xanthan	0.7	1.007	3.53	0.276	-
Xanthan	0.9	1.007	5.17	0.220	-
25 % Tomato paste + 2.0 % Corn starch		1.035	2.99	0.587	1.39
25 % Tomato paste + 3.0 % Corn starch		1.035	3.30	0.554	2.96

で迅速に粘性を評価できる測定器の設計とその使用法の考案すなわち粘性評価システムの構築が望まれている。

操作の容易性を求めた成果としていくつかの独特な粘度計が提案されてきている。これらはいずれも、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、経過時間に対して流動長さを測定して粘性を評価するものであり、測定器の構造が簡単であるという利点をもつ。複雑な解析をせず、ほとんどの場合流動長さを粘度指標とする。すなわち、経験的に、低粘度の液は流動長さが長く、液の粘度の増加に伴い長さが短くなることから粘性を評価する。このような粘性評価の原理は物理的な厳密性を欠いており、指標は粘度の目安を与えるにすぎず、品質管理や操作設計への使用に限られるという欠点をもつ。この欠点の原因に対する検討すなわち、測定器における流れを理論的または実験的に解析することにより粘度指標に明確な物理的意味を付することはデータの使用の範囲を拡大するのみならず、構造が簡単で、操作が容易である測定器の合理的な粘度計への展開に対して有用な指針を与えられ。食品工業において代表的な簡易型粘度計として広く用いられる Bostwick 粘度計についても測定値の意味付けに関する研究が行われているが、流体工学的な検討は比較的少なく、粘度計の進展に十分な解明に至っていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、Bostwick 粘度計を模擬した、溝型の流路をもつ測定器を用い、流れの実験的な解析に基づく液状食品の粘性評価を検討した。まず試験液について流動長さの経時変化を測定し、次に、測定器における流れを特徴付ける関係の導出を試みた。さらに、簡

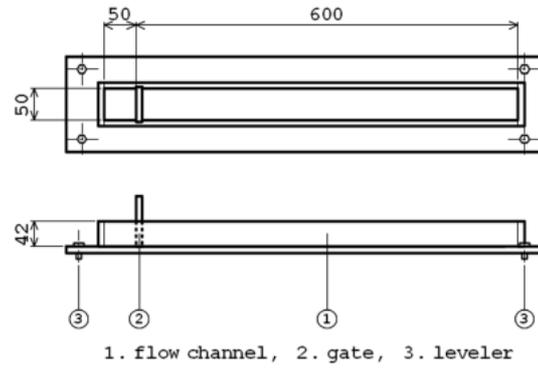


Figure 1. Schematic diagram of experimental apparatus (dimensions in mm).

易型粘度計としての合理的な適用を回転体型粘度計との比較において考察した。

## 3. 研究の方法

ニュートン性試験液としてグリセリンおよび水飴溶液、非ニュートン（擬塑性）性試験液にはキサントガム溶液を選んだ。非ニュートン性のモデル液状食品としてトマトピューレを用いた。ピューレは澱粉とともに加熱し、糊化により増粘させた。これらの液はいずれも 25 で扱った液の物性を Table 1 に示す。密度  $\rho$  はピクノメータにより測定した。コーンプレート型粘度計により剪断速度  $\dot{\gamma}$  を変えて剪断応力  $\tau$  を測定し、Herschel-Bulkley モデル [ Eq. (1) ] パラメータすなわち降伏応力  $\tau_0$ 、流動性指数  $n$ 、粘性係数  $k$  を決定した。

$$\tau/\dot{\gamma} = \mu = \tau_0/\dot{\gamma} + k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (1)$$

ここで  $\mu$  は粘度である。

Bostwick 粘度計を模擬した透明アクリル樹脂製溝型流路測定器の概略を Fig. 1 に示す。流路の寸法は長さ 650 mm、高さ 42 mm、幅 50 mm である。試料 (25 ) は、側壁、端壁、そこから流路方向 50 mm の位置にあるゲートで囲まれた区画に供した。ゲートを開けてから、液が流路を流れる様子を測定器の上、横、後からビデオカメラで撮影し、時系列画像上で液先端と、後壁となる端壁の間の長さ  $L$ 、後壁位置での液高さ  $h_0$  を測定した。測定は 25 で行った。

## 4. 研究成果

### 4.1 測定器における試験液の流れ

まずニュートン性および非ニュートン性の試験液について測定器における流れを解析した。解析では流動長さ  $L$  および後端高さ  $h_0$  を対象とした。 $h_0$  は流れ現象の進行に伴い  $L$  に比べて小さい変化を示すので、実験的に

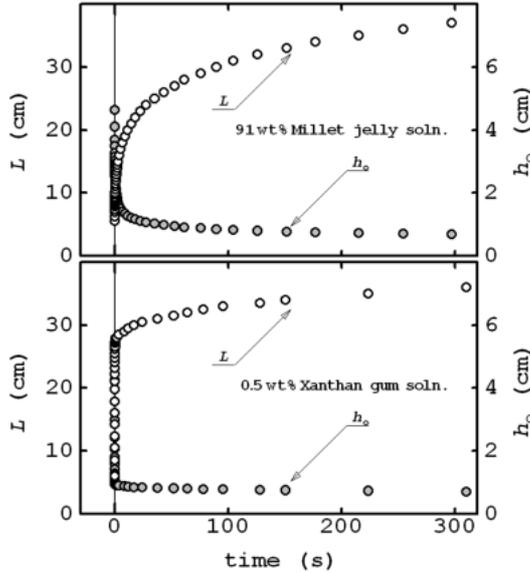


Figure 2. Time-courses of flow length,  $L$ , and backend height,  $h_0$ .

測定し難い量である．ここでは，McCarthy *et al.*による Bostwick 粘度計についての理論的な解析結果を参考にし，次式の関係に  $L$  の測定値を用いて  $h_0$  の値を求めた：

$$h_0 L = 0.002545 \quad (2)$$

Fig. 2 は  $L$  および  $h_0$  の経時変化を例示する．ゲートを開けた後， $h_0$  の急な減少にตอบสนองする  $L$  の増加すなわち大きな流動速度  $dL/dt$  が観られた．時間の経過とともに  $h_0$  の減少に伴って  $dL/dt$  は小さくなる傾向にあった．このような傾向はニュートン性または非ニュートン性という液の性質にかかわらず共通であった．Fig. 3 は測定器内の流れの経過を  $dL/dt$  と経過時間の片対数関係として示す．ゲート開放直後の時間帯を除いて  $dL/dt$  はほぼ同一の指数関数の形で減少した．測定器の実際的な利用に対しては流動長さや経過時間の測定の容易さから，ある程度時間が経過した後の時間帯がより適当であろう．よって，以下では，Fig. 3 に実線で示したような関係が観られる時間帯について解析を進めた．

#### 4.2 測定器における液流れの特徴付け

測定器における流れを特徴付けるため重力による 2 次元粘性流れを仮定した．Fig. 4 は，流路を流れる液の断面を  $x$ - $z$  座標系に表す．ここで次のような無次元パラメータを定義した：

$$\text{摩擦係数} : C_f = \tau / (\rho U_c^2 / 2) \quad (3)$$

$$\text{レイノルズ数} : Re = \rho U_c D_c / \mu \quad (4)$$

$\tau$  は剪断応力， $\rho$  は液密度， $\mu$  は液粘度である．代表速度  $U_c$  は流動速度  $dL/dt$ ，代表長さ  $D_c$  は後壁高さ  $h_0$  とした．水平方向の力の釣り合い

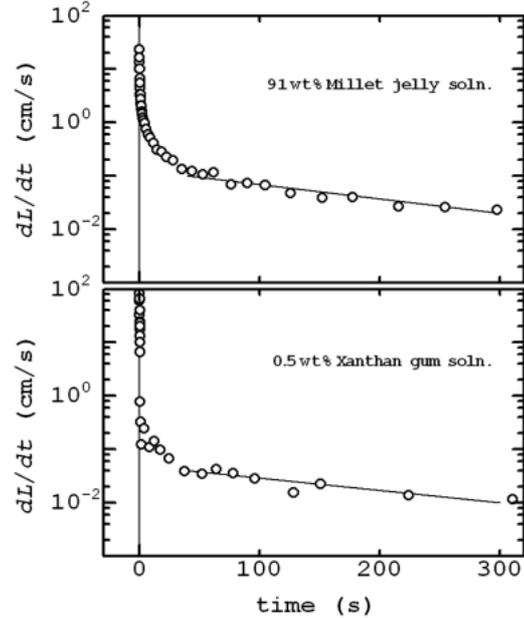


Figure 3. Time-course of flow rate,  $dL/dt$ .

から平均的な剪断応力  $\tau_{av}$  は， $g$  を重力加速度として次のように表される：

$$\tau_{av} = \rho g h_0^2 / 2L \quad (5)$$

これらのパラメータを用いると Eqs (3), (4) はそれぞれ次のように書き換えられる：

$$C_f = \tau_{av} / [\rho (dL/dt)^2 / 2] \quad (3)'$$

$$Re = \rho (dL/dt) h_0 / \mu \quad (4)'$$

Fig. 5 は  $C_f$  と  $Re$  の関係をニュートン性試験液について示す． $C_f$  は  $Re$  にほぼ反比例する関係にあり，測定器における流れは，粘性が支配的な層流であることが示された．結果として  $C_f$  は  $Re$  と次式のように関係付けられた：

$$C_f = 8.0 / Re \quad (6)$$

Eq. (6) は， $Re < 10$  という必要条件で類似の測定器にも適用できる関係であると期待される．

非ニュートン性試験液については，Eq. (4)' における粘度  $\mu$  は流れの経過とともに，すな

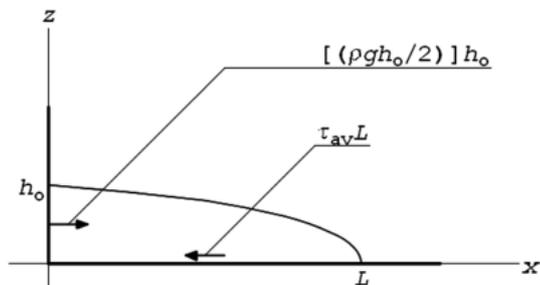


Figure 4. Sectional view of viscous liquid in flow channel and definition of  $x$ - $z$  coordinate system.

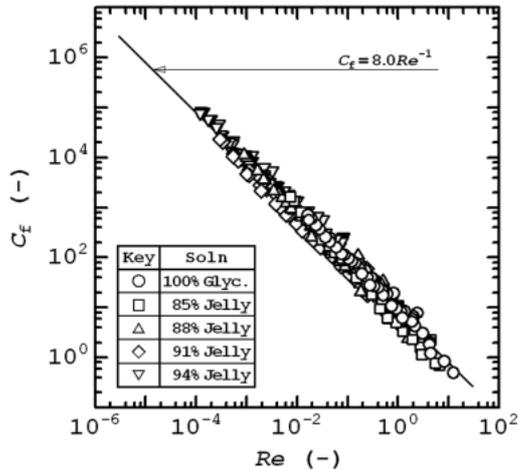


Figure 5. Relationship between friction coefficient,  $C_f$ , and Reynolds number,  $Re$ , for Newtonian test liquids.

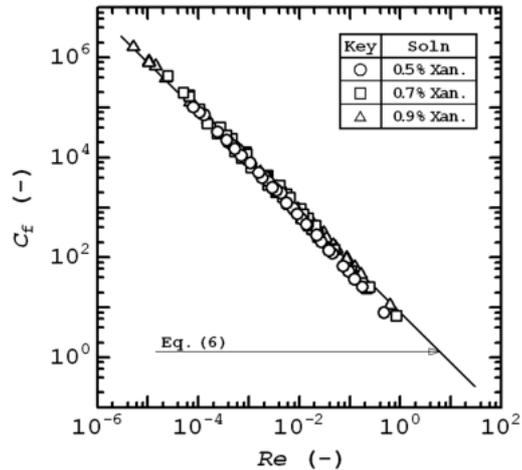


Figure 6. Relationship between friction coefficient,  $C_f$ , and Reynolds number,  $Re$ , for non-Newtonian test liquids.

わち剪断速度  $\dot{\gamma}$  に依存して変化するので、上述のような解析を行うためには測定器における  $\dot{\gamma}$  を評価する必要がある。ここで代表的な剪断速度  $\dot{\gamma}_c$  を、代表速度  $U_c$  と代表長さ  $D_c$  を用いて次のように表した：

$$\dot{\gamma}_c = C_c (U_c / D_c) = C_c [(dL/dt) / h_0] \quad (7)$$

係数  $C_c$  は、ニュートン性試験液での実験データを用いて決定した。すなわち、Eq. (1) と Eqs (5), (7) を組み合わせると

$$\mu = \tau_w / \dot{\gamma}_c = (1/C_c)(1/2)(\rho g)[h_0^3/L(dL/dt)] \quad (8)$$

Eq. (8) の右辺ブラケット内の項は、溝型流路測定器での測定値を用いて計算できる。左辺の  $\mu$  にコーンプレート型粘度計での測定値を用いれば  $C_c$  を決めることができ、Eq. (7) に基づく剪断速度の検定がなされることになる。検定の結果、 $C_c$  は液の粘度や流動速度により有意に変化せず、4.0 として算定され、Eq. (7) を次のように書き換えた：

$$\dot{\gamma}_c = 4.0 [(dL/dt) / h_0] \quad (7')$$

本研究では、Eq. (7)' による  $\dot{\gamma}_c$  を Eq. (1) に適用して非ニュートン性試験液の  $\mu$  を算出した。Eq. (7)' における右辺ブラケット内の項は、流路を流れる液の上面と下面の間で評価した平均的な剪断速度である (Fig. 4)。Eq. (7)' は、測定器における流れを特徴付ける剪断速度は平均速度の約 4 倍大きいことを意味している。速度勾配は測定器底部に近い領域でより大きいと考えられることから平均速度以上の  $\dot{\gamma}_c$  は、そのような領域での流れが全体の流れを支配するという点で説明される。

Fig. 6 は  $C_f$  と  $Re$  の関係を非ニュートン性試験液について示す。図中の実線はニュートン

性試験液についての Eq. (6) からの計算値である。上述のように解析した非ニュートン性試験液での関係はニュートン性試験液での関係とはほぼ同様と判断できた。Eq. (7)' から計算される  $\dot{\gamma}_c$  は約  $1 \text{ s}^{-1}$  以下にあり、本測定器はそのような剪断速度条件での粘性測定に利用

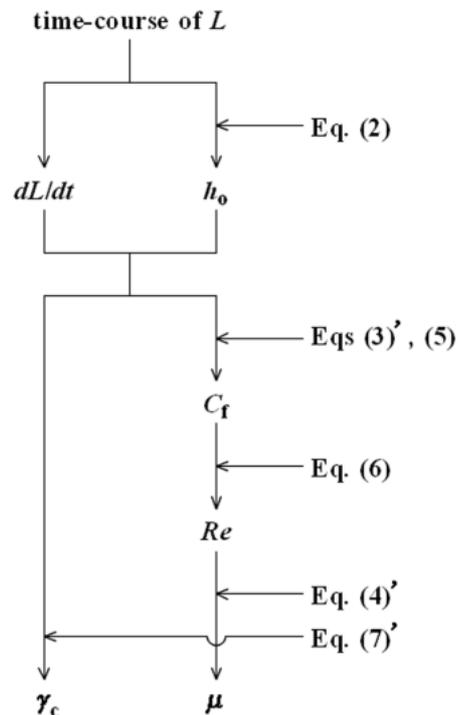
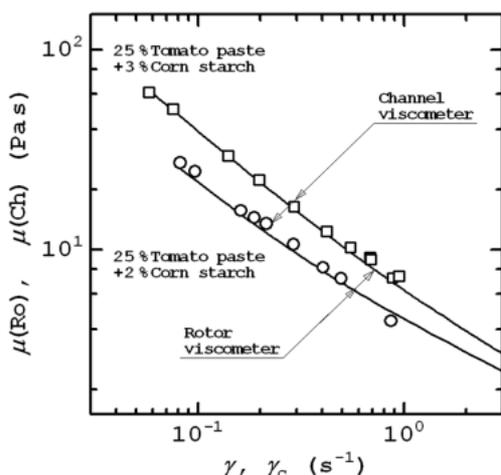


Figure 7. A procedure for evaluation of viscosity with flow channel instrument.



できると考えられる。

#### 4.3 測定器の粘度計への展開と液状食品の粘性の評価

Eq. (6)の実験的關係を用いて非ニュートン性液状食品の粘性を評価することを次に試みた。その手順を Fig. 7 に示す。密度が既知の試料に対して流動長さ  $L$  の経時変化を測定し、その時間微分として流動速度  $dL/dt$  および Eq. (2) から後壁高さ  $h_0$  を計算する。これらを Eqs (3)', (5) に用いて摩擦係数  $C_f$  を決定し、Eq. (6) の関係によりレイノルズ数  $Re$  を評価する。 $Re$  の定義式、Eq. (4)' を用いて粘度  $\mu$  が得られると同時に、Eq. (7)' を用いて剪断速度  $\dot{\gamma}_c$  が得られる。このような手順で評価した粘度  $\mu(\text{Ch})$  の  $\dot{\gamma}_c$  に対するプロットを Fig. 8 に示す。図では、コーンプレート型粘度計での測定値に基づき評価した粘度  $\mu(\text{Ro})$  と剪断速度  $\dot{\gamma}$  の関係を実線で示した。2 つの測定器による値の間の一致は良好であり、溝型流路粘性測定器すなわち本簡易型粘度計では、物理的意味が明確な粘度を満足できる程度の精度で評価できることが示された。

上述の方法によれば本簡易型粘度計では、限定された剪断速度範囲ではあるが、試料の流動曲線の作成が可能であることが確かめられた。一方で、より容易な操作で試料間の粘性を比較する状況が考えられる。従来簡易型粘度計を用いる液状食品の品質管理は特定の経過時間に対する流動長さのみにより行われてきた。Eq. (7)' が示すように剪断速度  $\dot{\gamma}_c$  は流動の長さ  $L$  と速度  $v$  の関数であるので、粘度は異なる剪断速度条件下で比較されることになる。それとは逆に特定の流動長さに対する経過時間の比較は、 $\dot{\gamma}_c$  は異なるが、Eq. (5) における剪断応力  $\tau_{av}$  は長さ  $L$  のみに依存するので応力同一条件下で行われることになる。流路を流れる液に生じる剪断応力が等しい

ことは断面の形状が同じであることを意味すると考えられる。すなわち、液状食品の垂れや注入を問題にする場合にはそのような基準で粘性を評価する方がより適当であり、合理的であると判断され、本方法は容易な操作での本簡易型粘度計の使用法として提案される。

#### 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)

[学会発表](計 4 件)

富樫綾, 吉田雅典 他, “簡易型粘性測定器内の液状食品の流動解析”, 2008 年度材料技術研究協会討論会, 12 月 6 日, 千葉県野田市 (2008), 2B-01

金原勇貴, 吉田雅典 他, “機械的回転翼攪拌槽における液状食品の調製”, 第 56 回レオロジー討論会, 10 月 6 日, 新潟県新潟市 (2008), P24.

富樫綾, 吉田雅典 他, “簡易型粘性測定器における液状食品の流動解析”, 第 56 回レオロジー討論会, 10 月 6 日, 新潟県新潟市 (2008), P23.

祖田明昌, 吉田雅典 他, “簡易型測定器による液状食品の粘性評価”, 2007 年度材料技術研究協会討論会, 12 月 1 日, 千葉県野田市 (2007), P76.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

吉田 雅典 (YOSHIDA MASANORI)  
新潟大学・自然科学系・助教  
研究者番号: 70282994

##### (2) 研究分担者

無し

##### (3) 連携研究者

無し