

管形粘度計による懸濁沈降性液状食品の 流動特性の測定

久保田清・栗栖真悟・鈴木寛一・保坂秀明

広島大学生物生産学部
1982年3月2日受理

Determination of Viscometric Behavior of Settling Suspension Foods by Tubular-type Viscometer

Kiyoshi KUBOTA, Shingo KURISU, Kanichi SUZUKI
and Hideaki HOSAKA

Faculty of Applied Biological Science, Hiroshima University, Fukuyama

(Figs. 1 ~ 8)

液状食品には、複雑な性状を示すものがあり、汎用されてきているオストワルド粘度計などが使えないことがある。前報¹⁾では、新しい型式の管形粘度計により、ドレッシング、ピューレなど容器壁附着性液状食品の流動特性の測定について報告した。

本報では、デンプン懸濁水溶液を例として、不安定な懸濁沈降性液状食品の流動特性の測定について報告する。

実験方法

1. 試料

半井化学薬品製のバレイショおよびトウモロコシデンプンを、蒸留水に加え、マグネティックスターラーで十分攪拌し懸濁水溶液としたものを、20℃、70 mm Hgの減圧下で、15分間脱泡して、所定濃度に調整し、試料として供した。

2. 流動特性および密度の測定

流動特性の測定に使用した装置は、前報¹⁾に図示している細管形粘度計と同じである。これは、2つの目盛つきの試料容器を細管で連結をして恒温槽中に入れたものである。試料容器に圧力差を交互に与えて反復測定ができる特徴をもっている。前報では、試料中に浮子をつけて容器壁附着性液状食品の測定を行ったが、本報では、試料容器の底部にマグネティックスターラー（東洋製作所製 MODEL 8-2）を取りつけて、懸濁沈降性試料であるデンプン懸濁水溶液を攪拌し、流動特性の測定を行った。本実験で使用した細管は、ガラス製で、半径 $r_w = 0.0746$ cm、長さ $L = 26.2$ cmである。密度の測定には、比重ビンを使用した。

流動方程式

1. 流動方程式

流動方程式は、簡単で、しかも幅広い流動挙動に対して利用できる次式を適用した。

$$\tau = (1/K)(g_c\tau - g_c\tau_y)^n \quad (1)$$

ここで、 τ (sec^{-1}) はせん断速度、 τ (gf/cm^2) はせん断応力、 g_c ($\text{g}\cdot\text{cm}/\text{gf}\cdot\text{sec}^2$) は重力換算係数である。 n, τ_y 及び K が、実験データから求めることになる粘性パラメータである。

本実験で測定される圧力差には、細管の両端における縮少、拡大に基づく圧力降下などが含まれるため、前報¹⁾と同様に Hagenbach 補正法²⁾により検定した。検定用試料には、粘度の値が既知の水を使用した。検定は、試料の測定と同一の攪拌条件下で行った。

2. パラメータの算出方法

体積流量 Q (cm^3/sec) 対、圧力差 ΔP (gf/cm^2) の関係の実験データから、流動方程式の中の粘性パラメータ n, τ_y および K の値を求めることになるが、前報¹⁾と同様に、非線形最小二乗法^{3,4)}を用いた。計算機は、名古屋大学大型計算機センター FACOM M-200 を使用した。

結果と考察

1. 実験結果と考察

バレイショおよびトウモロコシデンプン懸濁水溶液は、いずれも 1, 2, 4, 6, 8 および 10 wt% のものについて、流動特性と密度の測定を行った。測定温度は、10~50°C の範囲で、10°C 刻みとした。流動特性についての実験結果の一部を、Fig. 1~4 に示す。

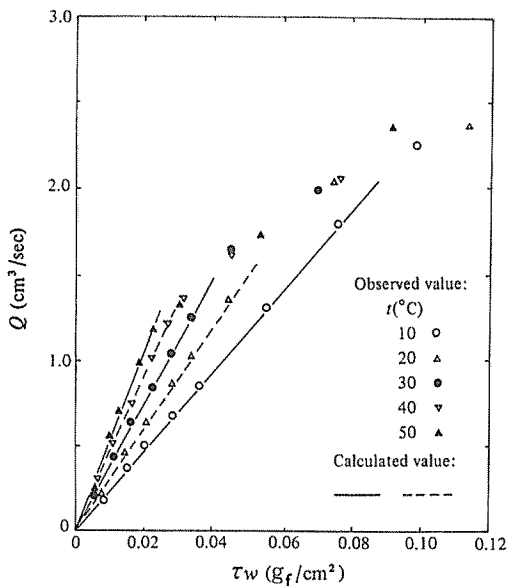


Fig. 1. Relations between the volumetric flow rate Q and the shear stress at the wall τ_w of 2.0 wt% potato starch suspension solutions.

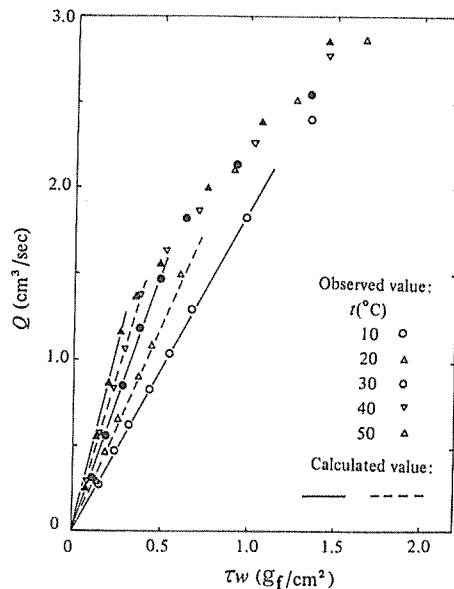


Fig. 2. Relations between the volumetric flow rate Q and the shear stress at the wall τ_w of 10.0 wt% potato starch suspension solutions.

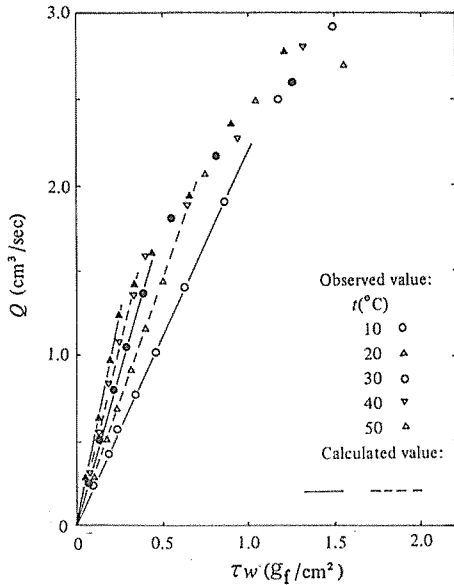


Fig. 3. Relations between the volumetric flow rate Q and the shear stress at the wall τ_w of 2.0 wt% corn starch suspension solutions.

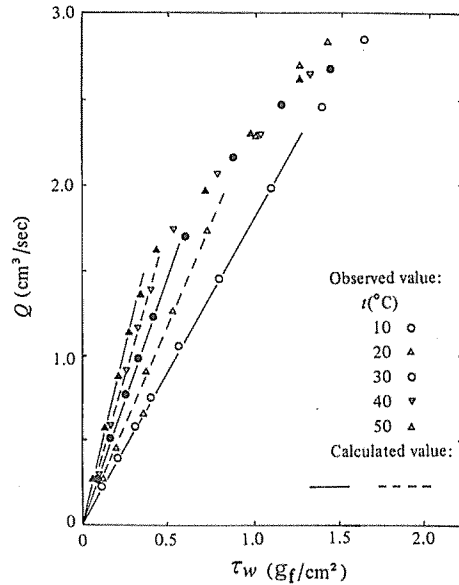


Fig. 4. Relations between the volumetric flow rate Q and the shear stress at the wall τ_w of 10.0 wt% corn starch suspension solutions.

横軸は、前報¹⁾に従って、管壁でのせん断応力 $\tau_w = r_w \Delta P / 2L$ (gf/cm^2) として示している。

式(1)の粘性パラメータを求めた結果、レイノルズ数の値が1350~1450以下の低流速域では、 $n \approx 1.0$, $\tau_y \approx 0.0$ となり、ニュートン流体として取り扱える結果が得られた。低流速域で、 $n = 1.0$, $\tau_y = 0.0$ として得られた K ($\text{g}/\text{cm} \cdot \text{sec}$) の値を、Fig. 5~6に示す。

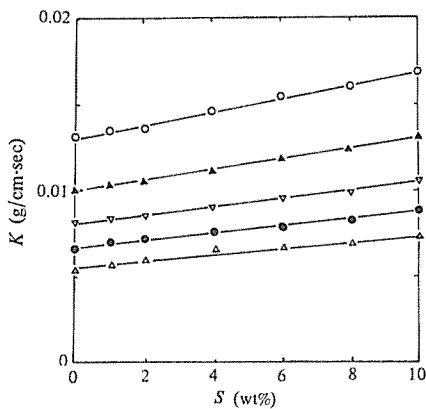


Fig. 5. Relations between the viscometric parameter K and the concentration S of potato starch suspension solutions.

Observed value: t (°C) 10 20 30 40 50
 ○ ▲ ▽ ● △
 Calculated value: —

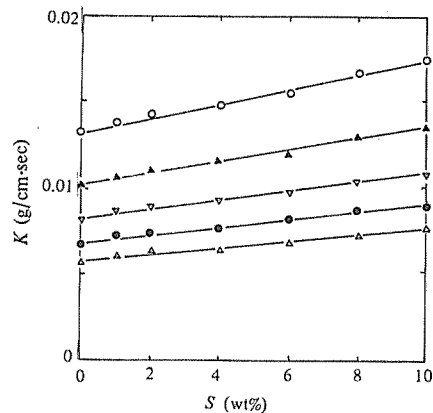


Fig. 6. Relations between the viscometric parameter K and the concentration S of corn starch suspension solutions.

Observed value: t (°C) 10 20 30 40 50
 ○ ▲ ▽ ● △
 Calculated value: —

一般に、レイノルズ数が2350位迄が層流になるとされており⁵⁾、流速範囲を拡大した場合についても粘性パラメータを求めた。流速範囲を拡大した場合は、 n の値が0.5位迄小さくなっていき、ダイラタンシー的な流動特性を示す結果となった。Fig. 1～4において、実験データが急激な屈曲を示しているがこのあたりがレイノルズ数の値が1350～1450付近となっている。流速範囲を拡大した場合に対しては、式(1)の適用が困難であったため、この場合の粘性パラメータの計算結果は省略する。

Fig. 1～4において、実験データが温度と濃度にほとんど無関係となり重なって傾斜が半分位までゆるくなっていく結果となっているが、これは、粘性が急激に2倍位に上昇するというものでは考えにくいことから、レイノルズ数の値が2300よりも低いところにおいて、乱流に変化している現象が起きているのではないかと考えられる。これと類似の結果が、脱脂粉乳水溶液の流動特性の実験において得られたことがある⁶⁾。

密度の測定についての実験結果を、Fig. 7～8に示す。

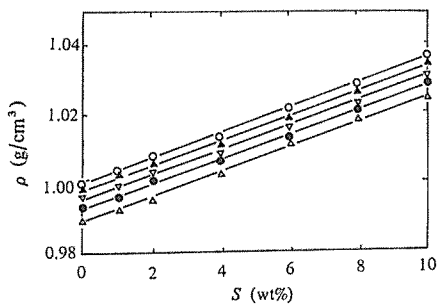


Fig. 7. Relations between the density ρ and the concentration S of potato starch suspension solutions.

Observed value: $t(^{\circ}\text{C})$ 10 20 30 40 50
 ○ ▲ ▽ ● △
 Calculated value: ———

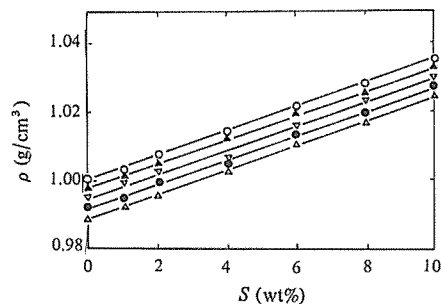


Fig. 8. Relations between the density ρ and the concentration S of corn starch suspension solutions.

Observed value: $t(^{\circ}\text{C})$ 10 20 30 40 50
 ○ ▲ ▽ ● △
 Calculated value: ———

2. 温度、濃度関係式の設定

各種工業装置の設計、操作計算を行っていくためには、流動特性に関するパラメータとか密度などの物性値を、温度などの関係式として表わしておくことが必要である。

粘性パラメータ K の値と温度 T [$^{\circ}\text{K}$]との関係は、これまでの著者らの各種デンプン糊化液^{7,8)}、脱脂粉乳水溶液⁶⁾、ドレッシングなど管壁付着性液状食品¹⁾、砂糖、食塩ならびにこれらの混合の脱脂粉乳水溶液^{9,10)}、各種植物油と食用油¹¹⁾の流動特性の研究結果と同様に次式によって表わされると考えられる。

$$K = A \exp(E/T^m) \quad (2)$$

ここで、 $m=1$ の場合が汎用されている Andrade の式^{12,13)}である。水では、 $m=3$ がよいとされている¹⁴⁾。ニュートン流体として表わされる低流速域に対して得られた K の値に対し、 A 、 E および m の値を求めた結果、 $m=1$ とするよりも $m=3$ とする方が僅かながら良いという結果となった。

式(2)において、 $m=3$ と固定して E の値を求めた結果、本実験条件内では濃度の影響を受けず一定となり、バレイショおよびトウモロコシデンプン懸濁水溶液に対して、それぞれ 5.776×10^7 、 5.802×10^7 となった。また、 A の値は、濃度 S [wt %]とほぼ直線的な関係となり、次式で簡単に表わすのがよいという結果となった。

$$A = \alpha + \beta S \quad (3)$$

式(3)の α と β をバレイショおよびトウモロコシデンプン懸濁水溶液に対して求めた結果、それぞれ $\alpha = 0.1019$ 、 0.1022 、 $\beta = 3.063 \times 10^{-3}$ 、 3.268×10^{-3} となった。標準偏差は、それぞれ0.01343、

0.01551 となった。計算結果を、Fig. 1～6 に示す。

これまでに濃度を変えた実験として、砂糖、食塩、脱脂粉乳水溶液の流動特性の測定を行ってきているが^{6,9,10}、 E の値が濃度の関数になる場合があったり、また、 A の値が濃度とべき数関係になるなどして表わされてきた。本研究で行ったデンプン懸濁水溶液に関する結果は、これまでの結果よりも濃度関係が比較的簡単になっている。 E の値が濃度に無関係となり、 A の値が直線関係になるという結果は、次に示す Einstein の式¹⁹が成立するという結果になる。

$$\mu/\mu_0 = 1 + kS^* \quad (4)$$

ここで、 μ, μ_0 ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$) は、懸濁液および分散媒の粘度、 $S^*(-)$ は、分散媒中の分散質の容積分率である。 k の値は、分散質間の相互干渉作用などが無視できる球形粒子では 2.5 になる係数として報告されてきている。本研究では、デンプン懸濁水溶液中のデンプンの容積分率を測定していないので、既往の k の値との比較検討ができないが、逆に、デンプン粒子が球形粒子であるなどの仮定をして、 $k = 2.5$ を用いて、 S と S^* の関係を推察すると次のようになる。

$$S^*/S = (\beta/\alpha) / 2.5 \quad (5)$$

式(5)より、バレイショおよびトウモロコシデンプン懸濁水溶液に対して、それぞれ $S^*/S = 1.202 \times 10^{-2}$ 、 1.279×10^{-2} となる。

固体の濃度が大きくなるなどすると、式(4)は適用できなくなり、Mooney の式¹⁹など各種の関係式¹⁹が報告されてきており、濃度関係式は、上記のように簡単に表わされなくなると考えられる。また、デンプン懸濁水溶液は、濃度が本実験条件範囲より大きくなってくると、ダイラタンシー的な流動特性を示す結果¹⁷が得られるのではないかと考えられる。

密度 ρ (g/cm^3) の値の温度および濃度関係は、これまでの研究^{10,11}によると次式によって表わされる。

$$\rho = a + bT^d + cS^e \quad (6)$$

バレイショおよびトウモロコシデンプン懸濁水溶液に対して、 $d = 1$ 、 $e = 1$ と固定して、 a 、 b 、 c の値を求めた結果、それぞれ $a = 1.078$ 、 1.081 、 $b = -2.755 \times 10^{-4}$ 、 -2.838×10^{-4} 、 $c = 3.575 \times 10^{-3}$ 、 3.516×10^{-3} となった。標準偏差は、それぞれ 8.552×10^{-4} 、 6.455×10^{-4} となった。計算結果を、Fig. 7、8 に示す。

また、式(6)において、 a 、 b 、 c 、 d 、 e の値を、非線形最小二乗法^{3,4}を用いて求めた結果は、それぞれ $a = 1.079$ 、 1.081 、 $b = -2.651 \times 10^{-4}$ 、 -2.847×10^{-4} 、 $c = 3.024$ 、 3.258 、 $d = 1.007$ 、 1.001 、 $e = 1.071$ 、 1.032 となり、標準偏差は、 7.914×10^{-4} 、 6.266×10^{-4} となった。 d および e の値はほぼ 1.0 として表わされた。 $d = 1$ 、 $e = 1$ と固定した結果と大差ない結果となっている。Fig 7、8 の実験データのばらつきからみて、簡単なもの、 $d = 1$ 、 $e = 1$ と固定した結果の方が有用と考えられる。

要 約

液状食品に関する各種装置の設計ならびに操作に関する研究を行っていくためには、液状食品の密度、粘度などを測定し、その結果を温度、濃度などの条件関係式として表わしておくことが必要である。本研究では、管形粘度計を用いて懸濁沈降性液状食品の流動特性を測定する方法について検討し、例として、デンプン懸濁水溶液の流動特性の測定を温度、濃度を変えて行った。次に示す結果を得た。

$$\tau = (1/K) (g_c \tau - g_c \tau_y)^n$$

$$K = A \exp(E/T^m)$$

$$A = \alpha + \beta S$$

$$\rho = a + bT + cS$$

バレイショ デンプン懸濁水溶液 ($T = 283 \sim 323^\circ\text{K}$ 、 $S = 0 \sim 10 \text{ wt } \%$):

$$n = 1.0, \quad \tau_y = 0.0, \quad m = 3.0,$$

$$E = 5.78 \times 10^7, \quad \alpha = 0.102,$$

$$\beta = 3.06 \times 10^{-3}, \quad a = 1.078,$$

$$b = -2.76 \times 10^{-4}, \quad c = 3.58 \times 10^{-3},$$

トウモロコシデンプン懸濁水溶液 ($T = 283 \sim 323 \text{ }^\circ\text{K}$, $S = 0 \sim 10 \text{ wt } \%$)

$$n = 1.0, \quad \tau_y = 0.0, \quad m = 3.0,$$

$$E = 5.80 \times 10^7, \quad \alpha = 0.102,$$

$$\beta = 3.27 \times 10^{-3}, \quad a = 1.081,$$

$$b = -2.84 \times 10^{-4}, \quad c = 3.52 \times 10^{-3}$$

ここで, r :せん断速度 (sec^{-1}), τ :せん断応力 (g_f/cm^2), g_c :重力換算係数 ($\text{g} \cdot \text{cm}/\text{g}_f \cdot \text{sec}^2$)
 T :温度 ($^\circ\text{K}$), S :濃度 ($\text{wt } \%$), ρ :密度 (g/cm^3) である。

主な使用記号

- A, E, m : 式(2)のパラメータ
 a, b, c, d, e : 式(6)のパラメータ
 g_c : 重力換算係数 ($\text{g} \cdot \text{cm}/\text{g}_f \cdot \text{sec}^2$)
 K : 流体コンシステンシー係数 ($\text{g}^n/\text{cm}^n \cdot \text{sec}^{2n-1}$)
 k : 式(4)のパラメータ
 L : 円管の長さ (cm^2)
 n : 流動挙動指数 (—)
 ΔP : 圧力差 (g_f/cm^2)
 Q : 体積流量 (cm^3/sec)
 r_w : 円管の半径 (cm)
 S, S^* : 濃度 ($\text{wt } \%$)
 T, t : 温度 ($^\circ\text{K}$) ($^\circ\text{C}$)
 α, β : 式(3)のパラメータ
 r : せん断速度 (sec^{-1})
 μ, μ_o : 懸濁液および分散媒の粘度 ($\text{g}/\text{cm} \cdot \text{sec}$)
 ρ : 密度 (g/cm^3)
 τ, τ_w, τ_y : せん断応力, 管壁でのせん断応力, 降伏値 (g_f/cm^2)

文 献

- 1) 久保田清, 松本俊也, 鈴木寛一, 保坂秀明: 日食工誌, 27, 543 (1980).
- 2) RAM, A. and TAMIR, A.: *Ind. Eng. Chem.*, 56(2), 47 (1964).
- 3) 久保田清, 森田徳義: 名古屋大学大型計算機センターニュース, 4 (4), 318 (1973).
- 4) 久保田清, 鈴木寛一, 保坂秀明: 食品工業, 22 (10), 49 (1979).
- 5) 化学工学協会編: 化学工学便覧, 改訂4版 (丸善, 東京), (1978).
- 6) KUBOTA, K., MATSUMOTO, T., SUZUKI, K. and HOSAKA, H.; *J. Fac. Appl. Biol. Sci., Hiroshima Univ.*, 19, 1 (1980).
- 7) KUBOTA, K., HOSOKAWA, Y., SUZUKI, K. and HOSAKA, H.: *J. Fac. Fish. Anim. Husb., Hiroshima Univ.*, 17, 1 (1978).
- 8) 久保田清, 細川嘉彦, 鈴木寛一, 保坂秀明: 日食工誌, 26, 399 (1979).
- 9) 久保田清, 栗栖真悟, 鈴木寛一, 松本俊也, 保坂秀明: 日食工誌, 28, 186 (1981).
- 10) KUBOTA, K., MATSUMOTO, T., KURISU, S., SUZUKI, K. and HOSAKA, H.: *J. Fac. Appl. Boil. Sci., Hiroshima Univ.*, 19, 133 (1980).

- 11) 久保田清, 栗栖真悟, 鈴木寛一, 松本俊也, 保坂秀明: 日食工誌, **29**, 印刷中 (1982).
- 12) ANDRADE, E. N. DA C, : *Phil. Mag.*, **17**, 497 (1943).
- 13) 平井英二: 化学技術者のためのレオロジー (丸善, 東京), p. 45 (1978).
- 14) 佐藤一雄: 物性定数推算法 (丸善, 東京), p. 264 (1954).
- 15) EINSTEIN, A. : *Ann. Phys.*, **19**, 289 (1906).
- 16) MOONEY, M. : *J. Colloid Sci.*, **6**, 162 (1951).
- 17) 平井: 化学工学, **22**, 379 (1958).

SUMMARY

In a previous paper ¹⁾, we have studied the flow behavior of stain foods by using a capillary tube viscometer. In the present one, we tried to propose new data by using the improved capillary viscometer for settling suspension foods. The improved viscometer has been operated under vigorous stirring of the suspension samples by using two magnetic mixers designed under two sample chambers. The viscometric behavior of starch suspension solutions was observed. For the low flow region, a Newtonian flow equation was applied. This flow equation has been expressed as follow:

$$\dot{\gamma} = (1/K) (g_c \tau - g_c \tau_y)^n, \quad K = A \exp (E/T^m)$$

For potato starch suspension solution (T=283 ~ 323°K, S=0 ~ 10wt%):

$$n = 1.0, \quad \tau_y = 0.0, \quad m = 3.0, \quad A = 3.06 \times 10^{-3} S + 0.102, \quad E = 5.78 \times 10^7$$

For corn starch suspension solution (Same to above T and S):

$$n = 1.0, \quad \tau_y = 0.0, \quad m = 3.0, \quad A = 3.27 \times 10^{-3} S + 0.102, \quad E = 5.80 \times 10^7$$

where, $\dot{\gamma}$: shear rate (sec⁻¹), τ : shear stress (g_f/cm²), T: temperature (°K), S: concentration (wt%) and g_c : gravitational conversion factor (g·cm/g_f·sec²).