管形粘度計による容器壁付着性液状食品の流動特性の測定

久保田 清*・松本俊也*・鈴木寛一*・保坂秀明*

Determination of Viscometric Behavior of Stain Foods by Tubular-type Viscometer

KIYOSHI KUBOTA*, TOSHIYA MATSUMOTO*, KANICHI SUZUKI*
and HIDEAKI HOSAKA

In previous papers, we have studied the flow behavior and the flow equations of starch pastes by using a capillary tube viscometer. In this paper, we proposed the application of a newly designed float-tubular-type viscometer to stain foods.

The viscometric behavior of mayonnaise 50 wt% solution, dressing, tomato juice, tomato mix juice, evaporated milk, milk, skim milk 17 wt% solution and tomato puree was observed by using this improved viscometer.

The flow equation was expressed as follow:

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

where γ ; shear rate (sec^{-1}), τ ; shear stress (gt/cm^2), and g_c ; gravitational conversion factor ($\text{g} \cdot \text{cm} / \text{gt} \cdot \text{sec}^2$). The flow parameters K , n and τ_y were calculated using a non-linear least square method. The values of K which derived from fixed n and τ_y were expressed by the Andrade equation.

(Received Mar. 26, 1980)

液状食品の流動特性の測定に対して、よく用いられる方法として、管形粘度計^{1)~9)}と回転形粘度計^{10)~14)}とを用いる方法がある。工業的な目的で、粘性の比較をしたり、粘性の変化を調べたりする場合には、広範囲の粘性の液状食品に適用でき、簡便であることから、後者の方がよく利用されてきているが、管内輸送の流動特性の解析を行なう場合には、前者の管形粘度計の方が有用である。

管形粘度計として、オストワルド粘度計とか、改良形が市販されており、よく利用されてきている。これらは、工業的な目的などで、粘性の比較をするだけのような場合には、簡便であるが、工業装置の設計、操作のための流動方程式を、流速を幅広く変えて求める研究をするような場合には適当でない。

液状食品には、高粘性のものが多いため、試料容器内に圧力をかけて、試料を円管から押し出し、流出量を測定する形式^{2)~4)8)}とか、ポンプを使用する形式¹⁾⁶⁾⁹⁾の円

管形粘度計を作製し、流動特性が測定されてきている。試料を循環⁵⁾させるか逆流反復使用¹⁰⁾しない場合には、試料容器が大きくなり、多くの試料を必要とし、温度調節も困難になってくると考えられる。

これまでに筆者らは、試料が比較的少量しかない場合にも、細管径と設定圧力差を広範囲に変えて、反復測定できる、簡便な円管形粘度計を作製し、デンプン糊化液の流動特性の測定などについて報告^{15)~19)}してきた。

これまでの装置では、容器壁に付着して液面を読みとりにくい液状食品に対して利用できない欠点があったが、この度、浮子の使用によって汎用性を附与し、2, 3の市販の液状食品の流動特性の測定を行なうことができたので報告する。

実験方法

1. 試料

試料は、いずれも市販のものを使用した。マヨネーズ

* 広島大学生物生産学部生物生産学科 (〒720 福山市緑町 2-17)

Department of Applied Biological Science, Faculty of Applied Biological Science, Hiroshima University, Fukuyama-shi, Hiroshima-ken

とドレッシングは、キューピー製のそれぞれマヨネーズとフレンチドレッシングを使用し、マヨネーズは、50 wt % 水溶液として使用した。トマトジュースとトマトミックスジュースとトマトピューレは、カゴメ製のそれぞれ果汁100% トマトジュースとカゴメ野菜ジュースとトマトピューレを使用した。エバミルクは、ネスル日本製の無糖練乳エバミルクを、牛乳は、チチヤス乳業製の無調整牛乳を使用した。スキムミルクは、雪印乳業製の粉状スキムミルクを、17.0 wt % 水溶液として使用した。

いずれの試料も、減圧乾燥機中において、30°C、110 mmHg の条件下で、60 分間脱泡して、次に述べる流動特性の測定に供した。

本研究では、径の異なる3本の細管を検定して、それに合う粘性のものを試料として用いたが、更に細管を太く変えていけば、稀釈しないマヨネーズとかケチャップなど粘性の大きい流状食品の流動特性の測定も可能である。

2. 浮子式管形粘度計

本研究で使用した浮子式管形粘度計の概要を、Fig. 1 に示す。これまでの報告^{15)~19)}において使用してきている管形粘度計において、図に示すような浮子をつけたものである。

Fig. 1 Schematic diagram of the float-tubular type viscometer

(1) capillary tube, (2) sample chamber, (3) constant-temperature water bath, (4) magnetic mixer, (5) vacuum pump, (6) mercury or water manometer, (7) buffer container, (8) needle valve, (9) cock, (10) float

2つの目盛つきの試料容器を、細管で連結して、恒温槽の中に入れた安価に自製できる形式のものである。真空ポンプを用いるなどして、試料容器に圧力差を交互に与えて、試料の細管内の流量を反復測定できるのが特徴である。設定圧力差を幅広く与えることができ、圧力差は、封液を水または水銀としたマンノメータを用いて読みとる。

本装置は、各種径の細管を用意して、簡単に取りかえ

ることができる特徴もある。真空ポンプを用いて減圧式で行なっているのは、接続部分をガラスのすり合わせ、ゴム管にすることができるためである。より広範囲に圧力差を与えたい場合には、加圧式にするといよい。食品には嫌酸素性のものがあるが、そのような場合には、窒素置換をするといよい。

これまでに、試料容器中の試料を磁気的に攪拌ができるように改良をし、各種の懸濁液に対しても利用できるようにしてきている。試料容器中の攪拌とか、流路の縮小、拡大とか、細管入口近くでの層流からのずれなどの影響などが問題になると考えられるため、標準試料を用いて、測定条件下で、検定して使用することになる。

本研究では、さらに、浮子式として、試料が容器壁に対して付着性があったり、着色をしていたり、液面上に小さな泡が浮いて除きにくかったりして、液面の判断がしにくい場合にも、利用できるように改良を行なった。各種の流動食品の流動特性の測定に汎用できる装置になったと考えられる。試料が付着性の場合に、一部の試料が容器壁に付着をするが、試料を反復させることと、容器径が大きいことからみて、誤差の範囲内であると考えられる。

浮子は、円柱状の発泡スチロールの底部に適当な重さのボルトを錘としてつけ、ボーメ比重計のような形式で作製した。浮子が容器壁に吸寄せられるため、液につかる部分の発泡スチロールの周囲に細かい針金の突起をつける細工をした。また、浮子の先端となる部分の容器壁が汚れて目盛が読みとれなくなるため、発泡スチロールの上部に細い竹ヒゴをつけ、竹ヒゴの先端を読みとるような細工も必要となった。

本実験で使用した細管は、牛乳に対して内径 0.0738 cm、長さ 25.9 cm (細管 A)、マヨネーズ 50 wt % 水溶液、トマトジュース、トマトミックスジュースに対して 0.1226 cm、24.3 cm (細管 B)、ドレッシング、エバミルク、トマトピューレに対して 0.1492 cm、26.2 cm (細管 C) である。

測定温度は、10~60°C の範囲で、10°C 刻みで一定とした。設定圧力を、40~600 g/cm² の範囲で変えて、2~20 cc の範囲で試料の一定量を、細管内を流動させるに要する時間を測定した。

流動方程式

1. 流動方程式

簡単で、幅広い流動挙動を表わし、よく利用されている次式の適用を試みる。

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

ここで、 $\gamma(\text{sec}^{-1})$ ：せん断速度、 $\tau(\text{g}/\text{cm}^2)$ ：せん断応力、 $g_c=980.7 \text{ g}\cdot\text{cm}/\text{g}_t\cdot\text{sec}^2$ ：重力換算係数である。 n 、 τ_y 、 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。ニュートン流体に対しては、 $n=1$ 、 $\tau_y=0$ となる。式(1)は、従属変数を γ として表わしているが、 τ を用いて表わされる場合もある。本報では、前報¹⁵⁾¹⁷⁾に従って、 γ を従属変数とする式(1)を使用する。

流体が、円管内を流れる場合には、式(1)は、次式¹⁵⁾となる。

$$Q = \{2\pi g_c n r_w^3 (\tau_w - \tau_y)^{n+1} / K \tau_w^3 \} \\ \{ (\tau_w - \tau_y)^2 / 2(n+3) + \tau_y (\tau_w - \tau_y) / (n+2) \\ + \tau_y^2 / 2(n+1) \} \quad (2)$$

$$\text{ただし、} \tau_w = r_w \Delta P / 2L \quad (3)$$

ここで、 $Q(\text{cm}^3/\text{sec})$ ：体積流量、 $r_w, L(\text{cm})$ ：円管の半径、長さ、 $\tau_w(\text{g}/\text{cm}^2)$ ：管壁でのせん断応力、 $\Delta P(\text{g}_t/\text{cm}^2)$ ：圧力差である。

前項で述べた装置において測定される圧力差には、細管内の圧力降下以外に、細管の両端における流路の縮小、拡大に基づく圧力降下などが含まれていると考えられる。粘度が既知の標準試料を用いて検定実験を行ない、補正をして ΔP を求めることになる。管長を長くとして補正する COUETTE 補正法と、測定圧力差を小さくして補正する HAGENBACH 補正法とがあるが²⁰⁾、本報では、前報^{15), 17)}に従って後者の方法により補正を行なう。

$$\Delta P = \Delta P_m - m_p \bar{u}^2 / g_c \quad (4)$$

ここで、 $\Delta P_m(\text{g}_t/\text{cm}^2)$ ：測定圧力差、 $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$ ：密度、 $\bar{u}(\text{cm}/\text{sec})$ ：平均流速である。 $m_p(-)$ が、標準試料を用いた検定実験から求めることになる HAGENBACH 係数である。

2. 粘性パラメータの計算方法

体積流量 Q と圧力差 ΔP_m の関係として得られる実験データから、式(2)に含まれる粘性パラメータ n, τ_y, K を求めることになるが、パラメータが非線形となつて含まれており、 $n=1$ とか $\tau_y=0$ とかにならない場合には、線形最小二乗法の適用ができない。近似的な方法²⁰⁾があるが、本報では、非線形最小二乗法を用い、デジタル計算機を利用した。粘性パラメータの計算は、次に示す標準偏差 σ の値を最小にすうようにして求めた。

$$\sigma = \left\{ \sum_{i=1}^N (Q_{\text{obs}} - Q_{\text{cal}})^2 / N \right\}^{1/2} \quad (5)$$

ここで、 $Q_{\text{obs}}, Q_{\text{cal}}(\text{cm}^3/\text{sec})$ ：体積流量の測定値と計算値、 $N(-)$ ：測定点の数である。

非線形最小二乗法による粘性パラメータの計算のプロ

Fig. 2 Flow chart for the calculation of viscometric parameters

グラムを、電子計算機利用の解説など¹⁵⁾²¹⁾に提供しており、利用できる。デジタル計算機は、名古屋大学大型計算機センター FACOM M-200 を使用した。

粘性パラメータ n, τ_y, K の計算の手順の概要を Fig. 2 に示す。体積流量 Q と管壁でのずり応力 τ_w との関係として得られる実験データから、第1段計算として、式(2)に含まれる粘性パラメータ n, τ_y, K を求める計算をする。 τ_w は、測定圧力 ΔP_m から、式(3), (4)を用いて得られる値である。 K は、ニュートン流動の粘度に相当する値で、流体コンシステンシー係数といわれる。試料の濃度、測定温度などによって変化する値である。この K の値は、流体挙動指数 n と降伏値 τ_y の値の僅かな変化で大きく変動するため、第2段計算として、 n と τ_y の値を固定し、 K の値を再計算をすることが必要となる。

n と τ_y の値が、試料の濃度、測定温度などの変化に対してある傾向の変化を示すときは、適当な関係式を設定して固定をしていくことになるが、何らかの傾向を示さず、ばらつく場合には、Fig. 2 に示すように、平均値を求めて固定するとよい。 n と τ_y の値を、関係式とか平均値で固定をして、再計算をして得られる K の値は、試料の濃度、測定温度を変数とした関係式として表わすことができる。温度関係式は、一般に、次の ANDRADE の式で表わされる。

$$K = A \exp(B/T) \quad (6)$$

ここで、 $T(^{\circ}\text{K})$: 測定温度である。 A, B が、測定温度を変えた実験データから求めることになるパラメータである。

結果と考察

1. 装置の検定

細管は、前報¹⁵⁾¹⁷⁾と同様に、検定を行なって使用した。各種濃度のグリセリン水溶液は、簡単なニュートン流体挙動を示し、幅広い粘性を与え、粘度の値が詳しく報告されている²²⁾²³⁾ため、標準試料としてよく利用されてきている。標準試料として、17.8~59.6 wt% のグリセリン水溶液を使用した。

式(4)に含まれる HARGENBACH 係数 m_p の値は、高レイノルズ数の層流領域では、一定値として扱えるが、低レイノルズ数の領域になると、レイノルズ数の値の減少に伴って大きくなっていく傾向がみられた。次式によって、レイノルズ数の関数として表わした。

$$m_p = a/Re^m + b \quad (7)$$

$$\text{ただし, } Re = 2r_w \bar{u} \rho / \mu \quad (8)$$

ここで、 Re (-): レイノルズ数、 μ (g/cm·sec): 粘度である。 a, m, b が、検定実験から求めることになるパラメータである。これらのパラメータの値は、細管によって異なったが、グリセリン水溶液の濃度とか測定温度には無関係な値として得られた。

2. 各種液状食品の測定

細管 A, B, C を使用して、測定温度 10~60 $^{\circ}\text{C}$ においてマヨネーズ 50 wt% 水溶液などに対して得られた実験結果を Fig. 3~6 に示す。測定点は、いずれも層流領域において得られた値である。曲線は、いずれも後で示す計算により求めた粘性パラメータによる計算値である。

牛乳とスキムミルク 17.0 wt% 水溶液は、 Q と τ_w との関係が直線関係となり、ニュートン流体挙動を示し、エバミルクは、牛乳より粘度が高く、僅かながら擬塑性流体挙動を示している。牛乳、スキムミルクは、ずり応力が小さいところでは、複雑な非ニュートン流体挙動²⁴⁾を示すようであるが、本実験条件下のようなずり応力が大きいところになると、ニュートン流体挙動²⁴⁾²⁵⁾を示すものと考えられる。

マヨネーズ 50 wt% 水溶液、トマトジュース、トマトミックスジュースは、いずれもよく似た擬塑性流体挙動を示し、ドレッシング、トマトピューレには、降伏値がみられ、複雑な非ニュートン流体挙動を示していることが分かる。Fig. 4 に示すトマトジュース、トマトミックス

Fig. 3 Volumetric flow rate Q vs. shear stress τ_w

mayonnaise (50 wt%): $n=1.3, \tau_y=0.0$
dressing: $n=1.3, \tau_y=0.20$

Fig. 4 Volumetric flow rate Q vs. shear stress τ_w

tomato juice: $n=1.3, \tau_y=0.0$
tomato mix juice: $n=1.3, \tau_y=0.0$

Fig. 5 Volumetric flow rate Q vs. shear stress τ_w
 evaporated milk: $n=1.1$, $\tau_y=0.0$
 milk : $n=1.0$, $\tau_y=0.0$

Fig. 6 Volumetric flow rate Q vs. shear stress τ_w
 skim milk (17.0wt%)²⁰⁾: $n=1.0$, $\tau_y=0.0$
 tomato puree : $n=1.4$, $\tau_y=0.10$

スジュースなどにおいて、測定点が、測定温度が高くなるほど少なくなっているが、これは、層流領域をすぎた測定点を割愛しているためである。

各種果物ジュース、ピューレなどについては、多くの研究が、管形粘度計²¹⁾⁴⁾⁹⁾とか、回転形粘度計^{10)~14)}を用いて行なわれているが、本実験結果と同様に、いずれも n の値は 1.0 より大きくなる結果となり、 τ_y の値がゼロとして取り扱えるものが多いようである。 n とか τ_y の値は、濃度など測定領域の変化によって変わってくる値と考えられる。測定方法によっても、いくらか異なってくるという報告²¹⁾²²⁾がある。本実験は、測定温度を変えた実験しか行なっていないが、個々の食品について、試料の濃度とか細管径の違いで、 n とか τ_y の値などがどのように影響を受けてくるかは、興味ある今後の研究課題である。特に、国産の各種流動食品についての流動特性の測定をまとめて行なった研究報告がみられないのが²⁶⁾残念である。

3. 粘性パラメータの計算結果

マヨネーズ 50 wt% 水溶液を例として、Fig. 2 に示した計算手順による粘性パラメータの計算結果を Table 1, 2 に示す。Table 1 の計算 A は、3つの粘性パラメ

Table 1 Viscometric parameters of mayonnaise (50 wt%)

t (°C)	Calc. A.			Calc. B. ($\tau_y=0.0$)	
	n	τ_y	K	n	K
10	1.273	0.0138	0.6437	1.344	1.0571
20	1.088	0.0261	0.1442	1.191	0.2914
30	1.255	0.0146	0.3352	1.316	0.5130
40	1.094	0.0295	0.1095	1.216	0.2490
50	1.233	0.0344	0.1924	1.399	0.5795
60	1.249	0.0240	0.1943	1.366	0.4340
average	1.172	0.0182	—	1.305	—

where, unit of n , τ_y , K : (—), (g/cm^2), ($\text{g}^n/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{2n-1}$)

Table 2 Viscometric parameter K of mayonnaise (50 wt%)

t (°C)	Calc. A'		Calc. B'	
	K	σ	K	σ
10	0.4114	0.0178	0.8055	0.0129
20	0.2908	0.0289	0.5689	0.0357
30	0.2379	0.0250	0.4650	0.0242
40	0.2137	0.0367	0.4176	0.0450
50	0.1621	0.0505	0.3162	0.0419
60	0.1491	0.0388	0.2906	0.0325

where, Calc. A': $n=1.2$, $\tau_y=0.02$
 Calc. B': $n=1.3$, $\tau_y=0.0$

ータ n , τ_y , K を計算する第1段の計算結果である。計算Bは、計算Aにおいて τ_y の値がゼロに近いことから、 τ_y の値をゼロとして計算をした結果である。計算A,Bにおいて、 n と τ_y の値が測定温度に対して何も傾向を示していないので、それぞれ平均値を求めた結果を Table 1 の一番下の行に示す。Table 1 において、 τ_y の値をゼロにすると、 n の値が少し大きく変わっているのは、 τ_y の値が影響しているためと考えられる。

Table 2 は、 n と τ_y の値を、それぞれ平均値で固定して、 K の値を再計算した第2段の計算結果である。計算A',B' は、それぞれ計算A,Bに対応する計算結果を示したものである。Table 2 において、計算A',B'の標準偏差 σ の値に大差がないことから、 τ_y の値をゼロとする方が簡単でよいと考えられる。 $n=1.3$, $\tau_y=0.0$ とした場合の粘性パラメータによる計算結果を、実験データと比較して Fig. 3 に実線で示す。流動方程式を、 τ_w の値が大きい範囲で使用する限り、 τ_y の値をゼロにしても問題はないと考えられる。本計算結果から、マヨネーズ 50 wt% 水溶液において僅かながら降伏値が認められたが、3つのパラメータの同時計算において、パラメータに相関性が生じてくるため、 τ_y の値がゼロで降伏値がないとも考えられないことはない。詳しくは、細管径を小さくして、 τ_w の値が小さい範囲での実験を行なって確かめる必要がある。降伏値とか、チクソトロピー流動挙動性などの特性の有無を詳しく確かめるには、回転粘度計がよい²⁷⁾といわれている。

その他の液状食品については最終的な粘性パラメータ計算結果を、Table 3 に示す。Table 3 に得られたパラメータによる計算値と実験データとの比較を示したのが、Fig. 3~6 の実線、破線である。

n と τ_y の値を固定して最終的に得られた、Table 2, 3 に示す K の値の温度関係は、式(6)に示した ANDRADE の式で与えられた。ANDRADE の式のパラメータ A,B の

Table 3 Viscometric parameter K of fluid foods

	dressing	tomato juice	tomato mix juice	evaporated milk
t (°C)	$n=1.3$ $\tau_y=0.20$	1.3 0.0	1.3 0.0	1.1 0.0
10	1.142	0.1594	0.2073	0.3329
20	1.127	0.1137	0.1586	0.2153
30	0.799	0.0821	0.1154	0.1493
40	0.629	0.0594	0.0368	0.1053
50	0.464	0.0507	0.0749	0.0768
60	0.412	—	0.0568	0.0619

	milk	skim milk (50wt%) ²⁰⁾	tomato puree	water ²⁴⁾
t (°C)	$n=1.0$ $\tau_y=0.0$	1.0 0.0	1.4 0.10	1.0 0.0
10	0.02503	—	5.446	0.01308
20	0.01731	—	2.810	0.01005
30	0.01382	0.02057	2.408	0.00801
40	0.01079	0.01556	1.724	0.00656
50	0.00853	0.01266	1.380	0.00549
60	0.00721	0.01031	1.041	0.00469

where, units of n, τ_y, K : (—), (g/cm^2), ($\text{g}^a/\text{cm}^a \cdot \text{sec}^{2a-1}$)

値を、Table 4 に示す。本実験で使用した液状食品に対して得られた B の値は、 $2 \sim 3 \times 10^8$ °K となり、 $3 \sim 10 \times 10^8$ °K といわれている値²⁷⁾に近い値である。

要 約

前報において、簡便で、反復測定できる細管粘度計を作製し、デンプン糊化液などの測定をしてきた。本報では、これを浮子式として、試料が容器壁に付着し、または着色し、さらには液面上に小さな泡が浮いて液面の判断がしにくい場合にも、利用できるように改良を行なって、2,3の市販の液状食品の流動特性の測定をした。また、粘性パラメータを非線形最小二乗法により求め、流動方程式を設定した。

Table 4 Andrade's parameters of fluid foods

fluid foods	A	B	fluid foods	A	B
mayonnaise (50 wt%)	9.394×10^{-4}	1.896×10^8	milk	6.455×10^{-6}	2.325×10^8
dressing	6.326×10^{-4}	2.157×10^8	skim milk ²⁰⁾ (17 wt%)	8.876×10^{-6}	2.437×10^8
tomato juice	1.073×10^{-5}	2.717×10^8	tomato puree	1.565×10^{-4}	2.924×10^8
tomato mix juice	3.736×10^{-6}	2.443×10^8	water ²⁴⁾	1.365×10^{-6}	1.939×10^8
evaporated milk	3.711×10^{-6}	3.221×10^8			

where, units of A,B: ($\text{g}^a/\text{cm}^a \cdot \text{sec}^{2a-1}$), (°K)

文 献

- 1) EOLKIN, D.: *Food Technol.*, **11**, 253 (1957).
- 2) CHARM, S.E.: *Food Res.*, **25**, 351 (1960).
- 3) RAM, A. and TAMIR, A.: *Ind. Eng. Chem.*, **56** (2), 47 (1964).
- 4) SARAVACOS, G.D.: *Food Technol.*, **22**, 1585 (1968).
- 5) SCALZO, A.M., DICKERSON, R.W., PEELER, JR., J.T. and READ, JR., R.B.: *Food Technol.*, **24**, 1301 (1970).
- 6) RAO, M.A., OTOYA PALOMINO, L.N. and BERNHARDT, L.W.: *J. Food Sci.*, **39**, 160 (1974).
- 7) 中村照子・峰下 雄: 家政誌, **26**, 116 (1975).
- 8) 金光総子・宮川金二郎: 家政誌, **26**, 571 (1975).
- 9) RAO, M.A. and BOURNE, M.C.: *J. Food Sci.*, **42**, 261 (1977).
- 10) CHARM, S.E. and MERRILL, E.W.: *Food Res.*, **24**, 319 (1959).
- 11) HARPER, J.C.: *Food Technol.*, **14**, 557 (1960).
- 12) CHARM, S.E.: *J. Food Sci.*, **28**, 107 (1963).
- 13) HARPER, J.C. and SAHRIGI, A.F. EL.: *J. Food Sci.*, **30**, 470 (1965).
- 14) SARAVACOS, G.D.: *J. Food Sci.*, **35**, 122 (1970).
- 15) KUBOTA, K., HOSOKAWA, Y., SUZUKI, K. and HOSAKA, H.: *J. Fac. Fish. Anim. Husb., Hiroshima Univ.*, **17**, 1 (1978).
- 16) 久保田清・細川嘉彦・鈴木寛一・保坂秀明: ニューフードインダストリー, **21** (4), 36 (1979).
- 17) 久保田清・細川嘉彦・鈴木寛一・保坂秀明: 日食工誌, **26**, 399 (1979).
- 18) 久保田清・細川嘉彦・鈴木寛一・保坂秀明: 食品の物性, 第5集 (食品資材研究会), p. 67-93 (1979).
- 19) KUBOTA, K., HOSOKAWA, Y., SUZUKI, K. and HOSAKA, H.: *J. Food Sci.*, **44**, 1394 (1979).
- 20) CHARM, S.E.: The Fundamentals of Food Engineering (AVI), p. 47~49, p. 57~61 (1963).
- 21) 久保田清・鈴木寛一・細川嘉彦: 食品工業, **22** (10), 49 (1979).
- 22) SHEELY, M.L.: *Ind. Eng. Chem.*, **24**, 1060 (1932).
- 23) LANGE, N.A.: Handbook of Chemistry, 10th ed. (McGraw-Hill), p. 1680~1681 (1967).
- 24) 峰下 雄: 食品の物性, 第2集 (食品資材研究会), p. 13~28 (1976).
- 25) BUCKINGHAM, J.H.: *J. Dairy Res.*, **24**, 25 (1978).
- 26) 食品科学便覧編集委員会編: 食品科学便覧 (共立出版), p. 238~244 (1978).
- 27) 飯山邦夫: ケミカルエンジニアリング, **13**(5), 25 (1968).

(昭和55年3月26日受理)