

# トウモロコシ油 O/W型エマルションの流動特性

鈴木 寛一

すずき・かんいち (広島大学生物生産学部)

## 1. はじめに

単一成分からなる液体物質、および溶質が溶媒中に完全に溶解している溶液系の大部分はニュートン流体として挙動すると考えてよい。これに対して、分散系液体物質の多くは非ニュートン流体としての流動挙動を示す。この分散系のレオロジー特性は、分散媒と分散物質の成分と濃度、分散物質の構造やサイズ、分散物質の界面状態などによって大きく影響を受ける。エマルションは液体の中に異種の液体が小滴又は微細な液滴として分散した液-液分散系として定義されるが、食品エマルションでは、マーガリンのように乳化後に液体脂が結晶化して半固体状で存在する場合もある。エマルションの物性は分散相と連続相、使用する乳化剤の物理的、化学的性質とそれぞれの濃度、および分散粒子の存在状態、即ち、組成と構造に依存する。

一般的に液状エマルションの流動特性は、分散相濃度が低い場合は分散粒子間の相互作用や分散粒子自体の特性の影響が相対的に無視でき、ニュートン流体として扱えることが多いが<sup>1,2)</sup>、分散相濃度が増すにつれて組成と構造の影響が顕著となり、非ニュートン性も増す場合が多い。特に、食品エマルションの流動特性は、用いる食用油脂類と乳化剤に加えて、安定性の向上や調味のために添加される各種の物質の種類と濃度によって大きく影響を受ける。さらに、油脂や乳化剤、その他の組成が同一でも、分散粒子の平均粒径と粒径分布の状態が異なれば流動挙動も異なることが多い。エマルションの流動特性を表わす既存の式は、連続相粘度と分散相の体積分率だけで表される粘度式が多いが、これはニュートン流体としての流動挙動を前提としたものである。しかし、エマルションの多くが非ニュートン性の流動特性を示すことはよく知られていることであり、また、食品エマルションのように流動挙動が多くの因子によって影響を受ける場合には、特に低い分散相濃度のエマルションを除いて既存の粘度式が適用できることはむしろ稀である。このことはエマルションの物性がそれだけ複雑であり、物性に関与する諸因子との関係で定量化するのが難しいことを反映している。乳化剤は乳化操作に最も基本的な成分であるが、乳化剤の乳化特性とエマルション物性との関係についても大方の傾向はつかめているものの、それらを定量化することは難しいとされ、従って、乳化剤の使用に際しては経験に頼ることが多いのが現状である。食品エマルションに使用される油脂類と乳化剤だけを考えても、その組み合わせは膨大な数になるが、安定性と共に流動特性は食品エマルションの品質を制御する上での最も重要な物性であり、流動特性に与える乳化剤の基本的特性を定量的に評価することは乳化操作に必須のことと考える。

第21回食品の物性に関するシンポジウムでは、油相にトウモロコシ油を用いて調製した比較的高

表1 エマルションの流動特性を規定する諸因子

因子	影響の内容
1. 分散相	
体積分率 ( $\phi$ )	粒子どうしの水力学的相互作用 凝集
粘度 ( $\mu$ )	ずり応力下又は密に充填した場合での粒子の変形 エマルションの粘度 粒子内流体の流れ
粒子径, 粒子径分布 粒子の形状 化学組成	流動挙動, 濃厚エマルションの粘弾性 凝集速度 粒子どうしの引力 界面での乳化剤の作用
2. 連続相	
粘度 ( $\mu_0$ )	エマルションの粘度
化学組成, pH 極性 電解質濃度	粒子間の相互作用のポテンシャルエネルギー 界面での乳化剤の作用 粒子表面の電位 乳化剤の溶解性
3. 乳化剤	
化学組成	水又は油経の溶解性 界面の吸着, 隔離作用
濃度	粘度, エマルションの溶解性 分散相のミセルへの溶解性
界面吸着膜	粒子径と粘度, 粒子間相互作用 吸着膜のレオロジー挙動による変形, 凝集, 界面スリップ
電気粘性効果	微小粒子の場合の粘度への影響
4. 添加物	
着色料 増粘剤 塩類, その他	粒子間相互作用 ゲル化, など

濃度の液状  $o/w$  エマルションの流動特性の測定結果を用いて, エマルションの流動特性を成分組成と構造との関係で研究する場合の問題点や定量化の可能性等について述べさせていただいた。本稿では, 特に乳化剤の種類と濃度がエマルションの粘度に与える影響の定量化に関して, 本研究で用いた手法と可能性等について得られた幾つかの知見を述べる。

## 2. エマルションの流動特性に影響を与える諸因子と粘度式

既往のエマルションの粘度式は, 粒子が剛体であり粒子間相互作用が無視できる希薄分散系の場合に適応される Einstein の粘度式<sup>3)</sup> に基礎をおいているものが多いため, エマルション粘度が連続相粘度と分散相の体積分率だけで表わされているものが大半である。しかし, エマルションの流動特性は表1に要約したように実に多くの因子によって影響を受けている<sup>1)</sup>。それらの諸因子がエマルションの粘度に与える影響を考慮した粘度式もいくつか示されてきたが, それぞれの研究に用いたエマルション系, 即ち, 連続相と分散相, 乳化剤の種類と濃度, および乳化条件が同一ではないために, 結果の適応条件はきわめて限定されてしまう。また, 粘度に限らず実際にエマルションの物性を測定する場合, 現在の乳化法では特定の因子の影響だけを変化させたエマルションを調製することはほとんど不可能で, 考慮したい因子以外の影響も複合的に含まれてしまうこともエマルシ

エマルジョンの物性研究を難しくしている。食品エマルジョンでは、総じて濃度が比較的高く粒子間相互作用を無視できない場合が多い。また、非ニュートン流動性が発現する場合には測定条件によってみかけ粘度が変化する。このようなエマルジョンの複雑な流動特性を乳化剤の種類と濃度との関係で一般化して論議しようとする場合には、エマルジョンの流動特性を支配している基本的な要因が何であるかを特定し確認することからはじめなければならない。この点に関しては、粒子界面での乳化剤の吸着量と存在状態がエマルジョンの物性に大きく関与しているとの認識が重要であり<sup>4)</sup>、その定量化が必要であると考えられる。

### 3. 実験方法

#### 3. 1 O/Wエマルジョンの調製

秤量したトウモロコシ油（味の素(株)コーンサラダ油）に所定量の乳化剤を溶解し（60℃）、これを所定量の蒸留水（水相にも乳化剤を用いる場合には所定量の乳化剤を溶解したもの）にガラス棒で攪拌しながら少量ずつ注いで粗いO/Wエマルジョン状に分散させ、次いでホモミキサー（特殊機化工業-M型）で乳化を行なった。平均粒子半径および粒子半径分布は、ホモミキサーの回転数と乳化時間を変化させることにより調整した。乳化中にエマルジョンに取り込まれた気泡は、減圧脱気（約60mmHg）により除いた。この脱気操作で蒸発した水分は、減圧脱気前後のエマルジョン重量を測定して分散相性濃度補正を行なった。油相に用いた乳化剤は粉末状大豆レシチン（理研ビタミン、レシオンP、以後SLと略記）とソルビタンモノラウレート（花王、エマゾールL-10（F）、SMLと略記）であり、水相用としてはポリオキシエチレンソルビタンモノラウレート（ナカライテスク、Tween 20）を用いた。O/Wエマルジョンを調製する場合、乳化剤は連続相（水相）側に添加するのが一般的とされるが、本研究では特に水相および油相の両方に乳化剤を添加してそれらの併用効果を検討する場合、または水溶性乳化剤だけを使用する場合以外は、分散相である油相だけに乳化剤を添加しO/Wエマルジョンを調製した。これは、連続相の粘度に与える乳化剤濃度の影響を無視できるようにするためと、エマルジョン粒子界面単位面積当りの乳化剤濃度をより確かに推定するためである。

#### 3. 2 流動特性の測定

測定にはずり応力可変型の円管粘度計を用いた（図1）<sup>5)</sup>。円管の内径は $D = 0.00401\text{m}$ 、長さ $L = 0.552\text{m}$ であり、管端効果補正および運動エネルギー損失補正は粘度が既知のグリセリン水溶液を用いて行なった。試料用シリンダーは約1リットルの内容積があり、それぞれのシリンダー

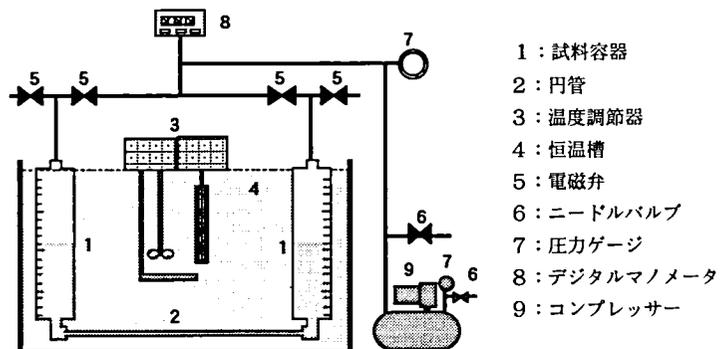


図1 円管型流動特性測定装置の概略図

ーに半分程度エマルションを充填し、電磁弁を操作して試料を一方のシリンダーから他方のシリンダーへ円管を通して交互に流し、その際の流量  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] と壁面ずり応力  $\tau_w = D \Delta P / (4L)$  [ $\text{Pa}$ ] の関係を測定した。測定は全て  $20^\circ\text{C}$  で行ない、ずり応力は空気圧差  $\Delta P$  [ $\text{Pa}$ ] で調節した。流動特性は次に示す Herschel-Bulkley モデル<sup>6)</sup> で解析したが、

$$\dot{\gamma} = (\tau_w - \tau_y)^n / K \quad (1)$$

ここで、 $\dot{\gamma}$  [ $1/\text{s}$ ] はずり速度、 $\tau_y$  [ $\text{Pa}$ ] は降伏値、 $K$  [ $\text{Pa}^n \cdot \text{s}$ ] はコンシステンシー係数。測定したエマルション系は降伏値を持たなかったため擬塑性流体として扱った。即ち、流動特性は流動挙動指数  $n$  およびコンシステンシー係数  $K$  の 2 つの流動パラメータで表した。各ずり応力に対応する見かけ粘度  $\mu_a$  [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ] は次式より求めた<sup>5)</sup>。

$$\mu_a = [(n+3) / 4] K \tau_w^{(1-n)} \quad (2)$$

### 3. 3 粒径分布の測定

調製したエマルションの一部を蒸留水で約 20 倍に希釈し、光学顕微鏡 (オリンパス BH-2) を用いて 400 倍で写真撮影した。そのネガフィルムをプロジェクターでデジタイザー (グラフテック, KW4300) 上に拡大投影し、粒径を約 1,000 個測定した。粒径分布の解析は、デジタイザーに接続したパーソナルコンピュータ (NEC.PC9801RX) で行なった。平均粒径には算術平均径を用い、乳化剤の粒子界面単位面積濃度を求める場合は、分散粒子が全て平均粒径に等しい粒径粒子の単分散系であると仮定して算出した。

## 4. トウモロコシ油 O/W エマルションの流動特性に与える諸因子の影響

### 4. 1 分散相 (油相) 濃度の影響

分散相濃度が流動特性に与える影響の一例を表 2 に示す<sup>5)</sup>。ここでは乳化剤として大豆レシチン、SML および Tween 20 を用いているが、各乳化剤で分散相に対する乳化剤の濃度を一定として、分散粒子界面での乳化剤濃度の影響を同一と見なせるようにした。この場合でも、調製したエマルションの平均粒径または粒径分布が異なると、分散粒子の総界面面積が異なり、結果として粒子界面での乳化剤濃度も異なることが予想されるが、本研究で用いた乳化法では粒径分布を厳密に制御することが不可能なため、分散相濃度を変えた場合でもすべて乳化条件を一定とした。測定したエマルション系では、分散相の体積分率が 0.30 以下ではいずれの乳化剤でもほぼニュートン流体として挙動すると扱えた。分散相濃度が増加するとエマルションの粘度も当然増加するが、その増加の程度は図 2 に示すように分散相濃度が同じでも乳化剤の種類によって異なった<sup>5)</sup>。また、乳化剤の種類によっては分散相濃度が増すにつれて非ニュートン性が強まったが、特に大豆レシチン

表 2 流動特性に与える分散相濃度の影響<sup>5)</sup>

乳化剤	We/Wo	$\phi$	$n$	$K$ [ $\text{Pa}^n \cdot \text{s}$ ]
大豆レシチン	0.065	0.318	1.00	0.0039
大豆レシチン	0.065	0.437	1.04	0.0112
大豆レシチン	0.065	0.553	1.13	0.0491
大豆レシチン	0.065	0.620	1.34	0.2087
SML	0.050	0.460	1.08	0.0065
SML	0.050	0.550	1.20	0.0199
Tween 20	0.054	0.318	1.03	0.0035
Tween 20	0.054	0.437	1.02	0.0076
Tween 20	0.054	0.553	1.04	0.0224

We/Wo: 乳化剤/分散相 (重量比)  $\phi$ : 分散相体積分率  
 $n$ : 流動挙動指数  $K$ : コンシステンシー係数

ではその傾向が強かった。  
Tween 20を用いた場合は分散相濃度が高くても流動挙動指数  $n$  はほぼ1に近く、非ニュートン性の発現は少なかった。

低濃度エマルションの粘度と分散相体積分率との関係についてはEinsteinの式<sup>3)</sup>がよく適応することが多い。しかし、高濃度エマルションの粘度のモデル式<sup>7,8,9)</sup>は、いずれも現実のエマルションの粘度より低い値に推算することが多い。これは、分散相の濃度や乳化剤の種類と濃度

がエマルション粒子の存在状態にどのように関与しているか定量化できていないことによるものと考えられる。また、非ニュートン流動性の発現も含めてエマルションの流動特性には、分散相濃度だけでなく乳化剤の種類と濃度の影響も大きく、粒子界面での乳化剤の存在状態との関係で検討する必要がある。

#### 4. 2 乳化剤の種類と濃度の影響

上の項でも述べたように、エマルションの流動特性は分散相濃度が同じでも、用いる乳化剤の種類と濃度に大きく影響を受ける。表3に大豆レシチンと Tween 20を用いた場合の乳化剤濃度が流動特性に与える影響の測定例を示す<sup>5)</sup>。油相の体積分率は0.553 (約50wt%) と高濃度であり、乳化剤濃度は油相に対する重量比 ( $We/Wo$ ) で示してある。この結果から Tween 20と比べて大豆レシチンは特に流動特性に大きく影響していることがわかる。実験結果から求めた流動パラメータと式(2)を用いて見かけ粘度を求め、乳化剤濃度との関係でプロットしたものを図3に示す<sup>5)</sup>。乳化剤濃度を示す横軸は  $We/Wo$  の値で表わしてあるためエマルション全体に対する実際の乳化剤濃度は横軸の値の約1/2となる。どちらの乳化剤も、濃度の増加に伴い見かけ粘度が増加したが、大豆レシチンの場合は特にその増加傾向は強く、乳化剤濃度を変えただけで見かけ粘度が数倍にも達した。大豆レシチンは油相に溶解し、連続相である水相には乳化剤を加えていないから、連続相の粘度が大きく変化しているとは考えられないが、Tween 20では連続相に溶解したために、その影響も見かけ粘度に出ているものとする。

図3では、見かけのずり速度が約  $3.1 \times 10^3 \text{ 1/s}$  と比較的高いずり速度での見かけ粘度を示したが、大豆レシチンを用いたエマルションは擬塑性が強いいため、低ずり速度範囲では Tween 20との差はさらに大きくなる。このように各乳化剤は、ここで示した例と同様にエマルションの流動特性に対してそれぞれ固有の濃度傾

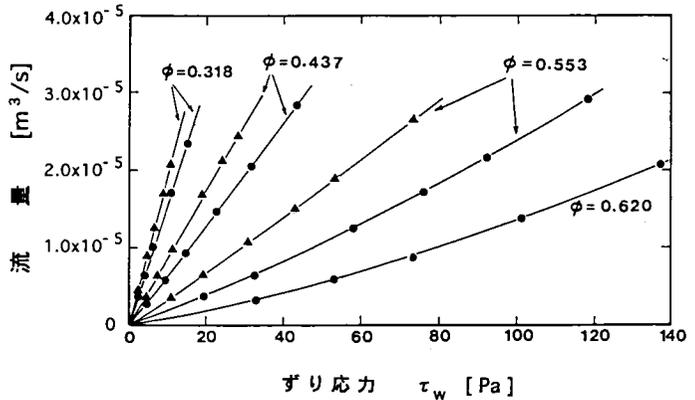


図2 流動特性に与える分散相濃度の影響<sup>5)</sup>

●● : 大豆レシチン,  $We/Wo = 0.065$   
▲▲ : Tween 20,  $We/Wo = 0.054$

表3 流動特性に与える乳化剤濃度の影響 ( $\phi = 0.553$ )<sup>5)</sup>

乳化剤	$We/Wo$	$n$	$K [\text{Pa}^n \cdot \text{s}]$	$hs [-]$
大豆レシチン	0.015	1.06	0.0144	1.39
大豆レシチン	0.031	1.07	0.0208	1.50
大豆レシチン	0.065	1.13	0.0491	1.65
大豆レシチン	0.122	1.38	0.412	1.77
Tween 20	0.014	1.04	0.0166	1.46
Tween 20	0.027	1.02	0.0163	1.56
Tween 20	0.054	1.04	0.0224	1.56
Tween 20	0.107	1.20	0.0711	1.66

向をもつものとする。

乳化剤濃度がゼロの場合には外挿される見かけ粘度の値は、大豆レシチンの場合0.0065Pa.s、Tween 20の場合で0.013Pa.sであった。分散相の体積分率が0.5程度のエマルジョンに適用される粘度式としては、Sibreeの式<sup>9,10)</sup>

$$\mu = \mu_o / [1 - (hs\phi)^{1/3}] \quad (3)$$

( $\mu_o$ : 連続相粘度)

がある。この式で $hs$ は分散相粒子界面への乳化剤等の吸着など、界面水和層形成に伴う分散相

子体積分率の見かけの増加を補正する係数である。式(3)で $hs=1$ とした場合、即ち、界面水和層の形成は無いとした場合 ( $\phi=0.553$ ) に計算されるエマルジョンの粘度は0.00561Pa.sであり、乳化剤濃度の影響がないものと仮定した場合の値にはほぼ一致する。従って、これらの結果より、分散相の体積分率が0.5程度のエマルジョンの中で、乳化剤が粒子間の相互作用や界面状態に影響しない場合にはSibreeの式が基本的に適用でき、さらに、乳化剤等が界面状態に影響を与える場合には、その影響の程度を補正係数 $hs$ を用いて定量化できる可能性があることを示唆している。そこで、各乳化剤の濃度がエマルジョンの粘度に与える影響を定量的に考察するために、式(2)と式(3)とから $hs$ を求める式を次のように得て、

$$hs = \frac{1}{\phi} \left\{ 1 - \frac{4 \mu_o \tau_w^{(n-1)}}{(n+3)K} \right\}^3 \quad (4)$$

これよりそれぞれの濃度条件に対応して $hs$ を算出してみた。測定したずり応力の範囲での $hs$ の値の変化は±2%以内と僅かであったのでその平均値を求めて表3に示した。この結果より明らかなように、 $hs$ の値は乳化剤濃度の増加に伴い増加し、その増加傾向は乳化剤の種類に固有する値であるように思われる。特に、大豆レシチンではその傾向が明瞭に現われたが、大豆レシチンは油性であり、連続相である水相には乳化剤を加えていないことから、連続相の粘度が見かけ粘度の増加に見合うだけ増加したとは考えられない。現象論的には、乳化剤濃度の増加に伴い分散相の体積が増加した、即ち、分散粒子の界面に存在する乳化剤が粒子の体積分率を見かけ上増加させており、その程度が乳化剤の種類と濃度に依存していると解釈される。このことはまた、流動特性の測定結果から逆に、粒子界面での乳化剤の存在量および存在状態を推定する手がかりを得ることが可能であることを示唆している。一方、エマルジョンの組成は同一であっても、乳化条件やエマルジョン粒子の粒径が異なると粘度が異なることはよく経験することである。もし、ここで示した結果のように粒子の界面に存在する乳化剤が粒子の体積分率を見かけ上増加させているならば、分散相濃度および乳化剤の種類と濃度が同一であっても界面面積、即ち、平均粒径又は粒径分布が異なれば界面単位面積当りの乳化剤濃度が異なることになるため、界面での乳化剤作用力の差異により結果的に流動特性も変化することの理由が解釈される。このことを、エマルジョン粒径と乳化剤濃度との関係で検討するために以下のような実験を行った。

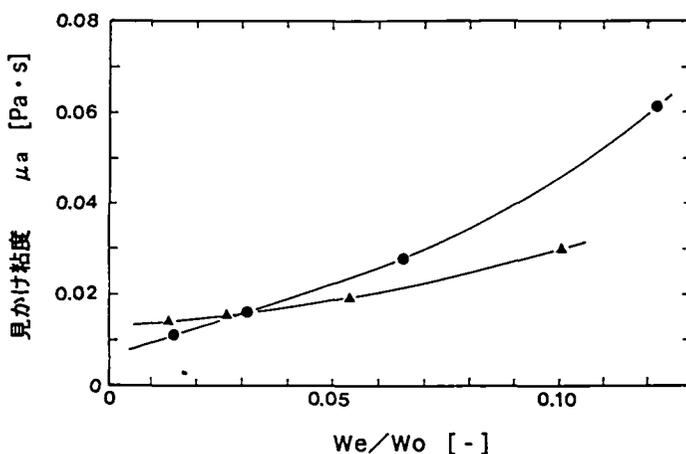


図3 見かけ粘度に与える乳化剤濃度の影響 ( $\phi=0.553$ )<sup>5)</sup>  
 ●●● : 大豆レシチン      ▲▲▲ : Tween 20

### 4. 3 流動特性に与える粒径の影響

流動特性に与える粒径の影響に関しては、粒径が乳化剤の界面濃度に直接関係していることから、粘度に与える濃度の影響の大きい乳化剤は粒径依存性も大きいと考えられる。粒径依存性の大きかった大豆レシチンの場合と、少なかった Tween 20 の場合の測定例を図 4 に示す<sup>11)</sup>。

大豆レシチンを用いた場合には、平均粒径の増加に伴い同じり応力に対する流量が減少し、粘度が増加する結果となった。一方、Tween 20 では、粒径の影響はほとんど見られなかった。従来より、エマルションの粘度は粒径が小さくなるほど増加するとの報告が一般的であるが、大豆レシチンの測定例では逆に粒径の減少に伴い粘度も減少する結果となった。本研究では、エマルション粒子界面単位面積当りの乳化剤濃度をより確かに推定するため、大豆レシチンは分散相に溶解して O/W エマルションを調製したが、この場合、分散相濃度が同じなら分散粒子の界面面積は平均粒径が小さいほど大きくなり、界面単位面積当りの乳化剤濃度は少なくなるものと考えられる。従って、粒径の小さいエマルションの粘度の方が低かったのは、粒子界面単位面積当りの大豆レシチン濃度が低かったためと推定される。以後、界面での乳化剤の存在による粒子体積の見かけの増加は、乳化剤の作用によって油-水界面に形成される界面水和層または界面吸着層が関与しているものと仮定し、その厚さを乳化剤の粒子界面濃度で定量化することを試みた。なお、流動特性は、平均粒径だけでなく粒径分布にも依存した。平均粒径がほぼ等しい場合でも、粒径分布の広いエマルションの方が擬塑性が強かったが<sup>s12)</sup>、この点に関する考察はここでは省略する。

### 4. 4 界面水和層厚さと界面乳化剤濃度との関係

大豆レシチンを用いた O/W エマルションについて、分散相濃度、乳化剤濃度および平均粒径を変化させて流動特性を測定し、見かけ粘度から分散相体積分率増加の補正係数  $h_s$  を求めた。一方、それらエマルションの平均粒径から粒子界面単位面積当りの乳化剤濃度  $Me$  [ $\text{kg}/\text{m}^2$ -界面] を求め、 $h_s$  との関係を検討した。その結果を図 5 に示すが、大豆レシチンでは  $h_s$  は  $Me$  の増加に伴い増加し、両対数紙上で直線関係 (相関係数: 0.885) を示した。これに対し、同じ油溶性の乳化剤である SML (Span 20 と同成分) および水溶性 Tween 20 では、粘度または分散相体積の見かけの増加に対する乳化剤濃度の影響はほとんどみられなかった。このような  $h_s$  と  $Me$  の関係の物理的意味については現在検討中である。ここでは述べなかったが、2 種類以上の乳化剤を併用した場合も、粘度に与える併用の影響は各乳化剤で特徴的である。従って、粘度等の測定結果から同様に界面水和層または吸着層の厚さに対する各々の乳化剤の寄与効果を解析することが可能となるものとする。

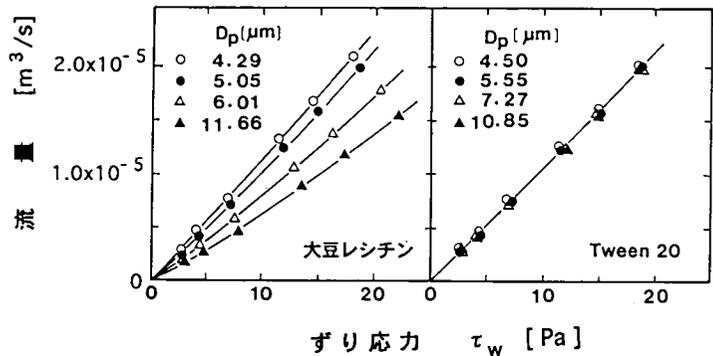


図 4 流動特性に与える平均粒径  $D_p$  の影響  
( $\phi=0.440$ ,  $We/W_o=0.0091$ )

## 5. おわりに

実際のエマルション系での界面状態は、本稿で述べたように単純ではなく、乳化剤の界面濃度だけで流動特性を論議することには問題があると思われる。しかし、エマルションの流動特性には粒子界面状態が大きく関与し、分散粒子界面での乳化剤濃度が推定できれば、エマルションの流

動特性に与える乳化剤の種類の影響を定量的に検討できる可能性があることを示した。また、粒子界面での水和層は、流動特性に関与するだけでなくエマルションの安定性とも大きくかかわっていると考える。これまで、エマルションの安定性には、主に粒子界面電位による静電反発力と粒子間引力にもとづく、所謂、DLVO理論<sup>13,14)</sup>によって論議されてきたが、さらに界面水和層の関与を含めた統一的な論理の展開が望まれる。それぞれの乳化剤に対して、粒子界面での存在状態と界面導電現象との関係を定量的に把握することができれば、流動特性だけでなくエマルションの安定性や乳化剤の乳化特性等もより確かに検討できるものと考えられる。

本稿では、界面乳化剤濃度を算出する際の界面面積は、エマルション粒子が平均粒径の単分散エマルションであると仮定した。エマルションの物性を研究する場合のジレンマがここにある。実際に調製されるエマルションは多分散であり、測定値にはこの多分散性の影響が含まれ、その影響の程度を定量化できないことが多いからである。従って、エマルションの物性を研究するためには、より単分散なエマルションを用いることが必要である。この点で単分散エマルションの調製が可能な新しい乳化法である膜乳化法<sup>15,16,17)</sup>がエマルション物性の基礎研究に大きく寄与することが期待される。エマルションの流動特性として重要な非ニュートン性についても、特に粒径分布と乳化剤の界面濃度との関係で解析する必要がある。本稿ではふれなかったが、この問題に関しても単分散エマルションを用いれば解析が進展するものと考えている。

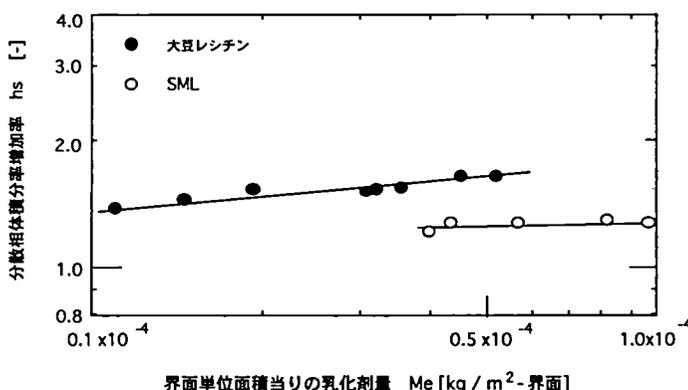


図5 分散相体積分率補正係数(増加率)  $hs$  と界面乳化剤量との関係  
大豆レシチン (0.5wt%~2.5wt%) :  $\phi = 0.46 \sim 0.64$   
SLM (2.0wt%~3.2wt%) :  $\phi = 0.55$

## 引用文献

- 1) Sherman, P. 1970. Industrial Rheology. Academic Press, London and New York
- 2) Rahalkar, R. R. 1992. Viscoelastic properties of oil-water emulsions, Ch. 12. In "Viscoelastic Properties of Foods," M.. Rao and J. F. Steffe (Ed.), P. 317. Elsevier Applied Science, London and New York.
- 3) Einstein, A. 1911. A correction of the article: A new method for determination of dimension of molecules. Ann. Phys. 24: 591.
- 4) Dickinson, E and Stainsby, G. 1988. Advances in Food Emulsions and Foams. Elsevier Appl. Sci., London and New York.

- 5) Suzuki, K., Maeda, T., Matsuoka, K. and Kubota, K. 1991. Effects of constituent concentration on rheological properties of corn oil-in-water emulsions. *J. Food Sci.*, 56: 796.
- 6) Herschel, W. H. and Bulkley, R. 1926. Measurement of consistency of rubber-benzen solutions. *Kolloid-Zeitschrift*, 39: 291.
- 7) Mooney, M. 1951. The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles. *J. Colloid Sci.* 6: 162.
- 8) Hatshek, E. 1911. The viscosity of dispersions. *Kolloid- Zeitschrift*, 8: 34.
- 9) Sibree, J. O. 1930. The viscosity of emulsions- Part I. *Trans. Farad. Soc.* 26: 26.
- 10) Sibree, J. O. 1930. The viscosity of emulsions- Part II. *Trans. Farad. Soc.* 27: 161.
- 11) Suzuki, K., Maeda, T., Esaka, M and Kubota, K. 1990. Rheological properties of corn oil-water o/w emulsions, In "Engineering and Food, Vol. 1," Spiess W. E. L & Schubert. H. (Ed.), p. 176. Elsevier Applied Science, London and New York.
- 12) Suzuki, K., Matsuoka, K. and Uno, K. 1992., Influence of constituent concentration and particle diameter on rheological properties of food emulsions, In "Advances in Food Engineering", Singh, R. P. & Wirakartakusumah, M. A. (Ed.), p. 529. CRC Press, Inc., Boca Raton.
- 13) 北原文雄, 古澤邦夫. 1993. 最新コロイド化学, 講談社サイエンティフィック, 東京.
- 14) Everett, D. E. (関 集三監訳), 1992. コロイド科学の基礎, 科学同人, 東京.
- 15) 中島忠夫, 清水正高. 1993. 多孔質ガラス膜による単分散O/Wエマルションの調製, 化学工学論文集, 19(6), 984.
- 16) 鈴木寛一. 1996. 膜乳化法による食品エマルションの調製とその特性, 膜 (MEMBRANE) 21(2), 96.
- 17) Suzuki, K., Shuto, I. and Hagura, Y. 1996. Characteristics of the membrane emulsification method combined with preliminary emulsification for preparing corn oil-in-water emulsions, *Food Science and Technology, International*, 2(1): 43