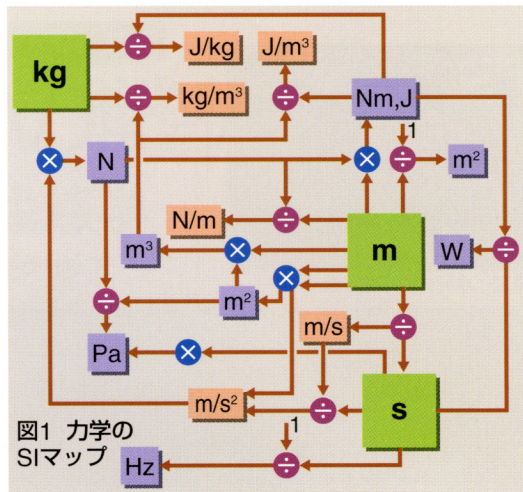


# 「粘度の巻」

一口に液体と言っても、その物性は完璧にとらえにくい。高分子や固体に限りなく近いものなども生み出され、なかなか一筋縄では行かなくなってきているからです。その中で粘度測定は、物性を知る手がかりとして期待され、また技術革新も進んでいる分野です。その容易ならざる分野に、粘っこく迫ってみましょう。

取材協力／東機産業(株)



## マヨネーズには“迷うねズ”？!

皆さんは、マヨネーズを手作りした経験がおありでしょうか？ 未経験の方のためにレシピを簡単に説明しますと——①卵黄に塩と酢を入れて軽くかき混ぜる。②サラダ油を少しずつ注ぎながら、泡立て器で粘りを出すようにかき混ぜる。注意点はサラダ油の量と注ぎ方。一度に注ぐと、なかなか粘りが出ません。

卵黄の量に比例して酢やサラダ油の量も多くなりますが、味と粘りを確かめながら「これが究極のマヨネーズだ!」と思えるまでかき混ぜるのがポイントです。けっこう手間がかかります。今は、そんな手間をかけなくても美味しいマヨネーズが売っていますから、テイストに合うものが簡単に手に入ります。

ところで、マヨネーズって何でしょう？ 日本農林規格(JAS)では——

半固形状(内粘度が3万mPa・s以上のもの)ドレッシングのうち、卵黄、卵白、タンパク加水分解物、食塩、糖類、香辛料、調味料及び酸味料以外の原料を使用していないもの。油分65%以上(通常70~80%)、水分30%以下——と規定されています。したがって、近ごろ流行りの低カロリー、低コレステロールなどのタイプは、油分が足りず、それを増粘剤や乳化剤などを入れて補い、テクスチャーだけマヨネーズらしくした「マネヨーズ」なのです。

マヨネーズで問われる粘性特性に、「降伏値」があります。マヨネーズは各種クリームと同じ軟塑性体(塑性流体)で、そのままでは流動しませんが、力(応力)を加えると流動するのが特徴です。その流動し始める応力の限界値が「降伏値」なのです。単位はPa(パスカル) = N/m<sup>2</sup>で表されます。

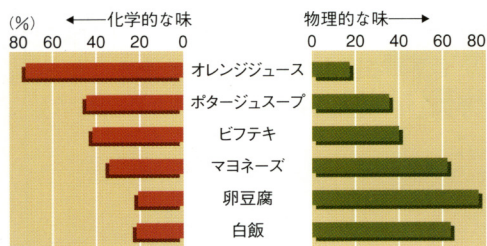
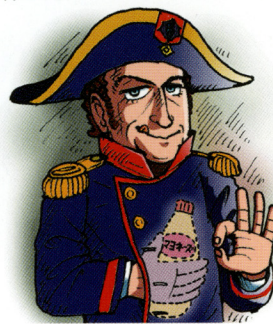


図2 エネルギー変換の例

食べ物のおいしさは、化学的な味(甘味、塩味、酸味、旨味など)と物理的な味(噛みごたえ、舌ざわりなど)に分けられます。マヨネーズは、野菜や魚介類、肉などにかけたとき、ある程度固さ、すなわち物理的な味が求められる食品です。サラダのさまざまな素材をつなぐ役目もあり、それが降伏値、粘度と密接に結びついているのです。

## マヨネーズこぼれ話

マヨネーズは、かのナポレオン1世がスペインに侵攻した際、バルセロナ沖のミノルカ島マオンから持ち帰った。地元の主婦が作ったドレッシングがパリの宮廷に“マオンネーズ=Mayonnaise”として紹介され、マヨネーズと言いつつ慣らされるようになった。日本では、大正14年(1925年)にキューピーの創業者・中島薫一郎氏が製造販売を開始。当時は年間生産量が600t余、現在は20数万tにまで伸びた。



ここで、このシリーズの第2回「圧力の巻」を思い出してください。「1Paとは、1m<sup>2</sup>の面積に1N(1kgの物体に1m/s<sup>2</sup>の加速度を与えるような力)が作用するときの圧力」という内容でした。1Paはかなりの力ですが、マヨネーズの降伏値も3~40Paと大きい(降伏値では通常1/1,000のmPaが用いられます)。つまり、マヨネーズは保形性があり、チューブから絞り出したときに垂れたり流れ



ニュートン性	非ニュートン性					
	擬塑性	ダイラタント	塑性		時間依存性	
			ビンガム	非ビンガム	チクソトロピー	レオペキシー
水 一般溶剤 単相溶剤 モーターオイル 植物油 砂糖水溶液 食塩水溶液 液体パラフィン グリセリン シリコン油 油性化粧品 水性化粧品 アルギン酸ソーダ	高分子融液および溶液 (ゴム溶液、粘着のり、 でんぷんのり、ビスコ ース、ラテックス、ア セテート筋糸液) エマルジョン ラッカー・ワニス 塗料・燃料 ワックス グリース ラード コンデンスミルク コンデンスフルーツ ジュース 紙パルプ アルミニウム石鹸	でんぷん水溶液 雲母・石英末の水サス ペンション (高濃度) 粘土スラリー 流砂・湿った海浜の砂 塗料 カーボンテトラクロライド バターミルク製チョコ レート	トマトケチャップ マーガリン 練歯磨・栄養クリーム 各種スラリー 窯業ペースト・相陶土 泡立てた卵白 パテ・石灰乳 こんにやく精粉水溶液 (良質)	塗料 印刷インキ マヨネーズ こんにやく精粉水溶液 (優質) アスファルト 濃厚サスペンション	塗料 ココア 重印刷インキ クレンジングクリーム パニシングクリーム 粘土サスペンション グリース 練歯磨き	粘土スラリー

擬塑性：ずり速度(またはずり応力)が増加すると、粘度(みかけ粘度)が低下する性質  
 ダイラタント：ずり速度(またはずり応力)の増加とともに粘度も増加する性質  
 塑性流体：図4のような降伏値 $s_0$ を有する流体  
 ビンガム：降伏値をもつ流動性の液体。  
 チクソトロピー：一定のずり変形(ずり速度)  
 やずり応力を加えると、構造破壊や回復に不均衡を来し、時間と共に粘度が低下する性質  
 レオペキシー：チクソトロピーと逆の性質。この性質をもつ物質は稀

表1 液体の物性による分類

たりしない「流動における固さ」を持っています。それが、降伏値で測られるわけです。一般に粘度は、応力×時間でPa・sと表します。

ご存じのように、マヨネーズは温度が上昇すると軟らかくなります(降伏値が下がる)。規格に合ったマヨネーズを作る場合、温度も重要な条件になります。

## 物性探偵「レオロジー」

今日、物性を計測・測定する技術は、製品の品質や安全のために必要不可欠な技術の一つとなっています。その中で物質の流動と変形に関する科学は「レオロジー」と呼ばれ、よく耳にするようになりました。固体と液体に適用され、その進歩は目を見張るものがあります。固体でいえば、ゴムの弾性や熱変性などを測定する方法が代表的です。

粘度、降伏値は、液体のレオロジーから生まれた計測値です。細かい話をすると煩雑なので、大雑把にご説明しましょう。液体の物性は、大きくニュートン性と非ニュートン性に分けられます(表1)。ニュートン性とは、 $s = \eta D$  ( $s$ : ずり応力、 $\eta$ : ニュートン粘度、 $D$ : ずり速度= $s$ )の流動方程式が当てはまり、

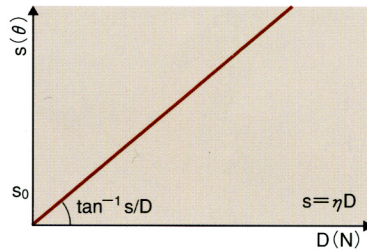


図3 ニュートン性流体のグラフ

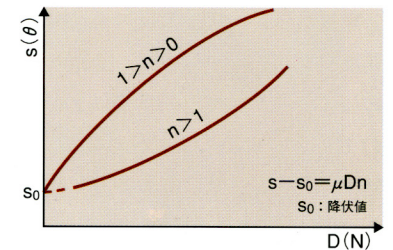
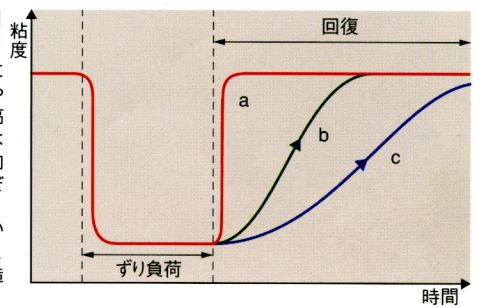


図4 非ビンガム塑性

図5 チクソトロピーの概念図

a: 擬塑性で瞬時に粘度が回復する  
 b, c: チクソトロピー性をもち、回復に若干の時間を要する。たとえば、塗料やインキなどのコーティング材では、高ずり状態で粘度が低下して流動性がよくなり、刷毛さびきなどの作業性も向上する。しかし、cのように回復が遅すぎるとタレを生じる。  
 [結論/チクソトロピーの計測結果から、固化するまでの最適時間を調整し、本来の目的に合った製品を均一に製造することができる]



回転粘度計で測れば図3のような正比例のグラフで表されます。非ニュートン性は、この方程式が成り立たない液体すべてのことです。

ずりは、トランプに置き換えて考えてみるとよくわかります。トランプの束をゆっくりずらすと、「ずり変形」が生じます。ここで、一番上のカードの速度をカード束の高さで割った数値「ずり速度」が求められます。そして、かけたずり応力とずり速度の比が粘度(粘性係数)なのです。

このように物性による分類が必要になってきたのは、1900年代に入り、

コロイドからエマルジョン、サスペンション、高分子溶液といった複雑な構造の物質が市場を席卷し始めてからのこと。世の中がシンプルな分類を指向するのは逆に、液体の新顔が次々に登場して「そうは間屋が卸さん」とばかりに細分化するニーズを生み、レオロジーの隆盛を生んだのです。勿論、工業製品のPL法施行の影響もあります。つまり、物質の《Who's Who=紳士録》を作ることができます。

非ニュートン性のうち、マヨネーズの属する非ビンガム塑性について



少々。図4は、非ビンガム塑性を表すグラフです。この図で、 $n$ （非ニュートン粘性指数）の値によって異なる物性を示すことがわかります。これを言葉で表現すると——流動開始（降伏値）までは $n$ の差はほとんど無関係だが、そこを超えると $n$ の違いで擬塑性とダイラタント性に分かれる、といえます。マヨネーズは、擬塑性物質に含まれます。

## 粘度測定が変わる

粘度計といえば、大抵の人は回転粘度計を思い浮かべます。それもそのはず、巷の粘度計の半分以上がこのタイプですから。回転粘度計は、粘度を撈拌抵抗値に置き換えて測定します。そのうち主な2タイプ（a アナログ式単一円筒形回転粘度計、b デジタル式単一円筒形回転粘度計）は、図6のような基本構造です。aの代表的タイプ「B形（発明者ブルックフィールドにちなむ）粘度計」は国内で40年以上も使われていて、ISO、ASTM、JISなどの規格にも則しています。bは、aの上位タイプと考えられ、利用者からの難しいニーズに答えて開発されました。

粘度計販売の東機産業（株）では、bタイプのTV形が21世紀の主流になるだろうと予想しています。その

主な特徴を下にまとめます。際立った特徴は、「ピボットレス機構」です。これまでのB形は、ローター（回転体）の軸心を支える軸受が付いていて、長期間の使用によって軸心の摩擦を招き、精度の信頼性や安定性を脅かす懸念もありました。「ピボットレス機構」は軸受を磁気による非接触にして、B形の課題をクリアしたものの。TV-10形は、B形のように計測者の経験があまり問われないのも大きな特徴といえます。（図7）

### TV-10形粘度計の主な特徴

- ①ピボットレス機構／モータの回転をトーションワイヤによってロータに伝えるしくみで、高精度を維持しながら部品の損耗が少ない
- ②デジタル表示／読み取り誤差が生じない
- ③オートストップ機能／測定時間を任意に設定でき、測定を終えれば自動的にストップ。測定値、経過時間は表示が保持される
- ④ロータ取付／ロータの着脱が簡単なロッド挿入方式を採用
- ⑤データの互換性／B形粘度計とのデータ互換性があり、JIS規格、ISO規格にも適合

粘度計の校正は、通産省工業技術院計量研究所の試験をパスした13種類の標準液（炭化水素油）を使って行います。それによって、ISO水準のトレーサビリティが確保されます。JIS規格化（JIS Z8809）されている13種類の分類は、20℃の環境条件での動粘度( $\text{mm}^2/\text{s}$ )で示されます。

たとえば、JS5、JS100、JS2000（最小2.5、最大160000）というように。これらの中から、校正しようとする粘度計に予め規定されている基準値と同じ程度の液を選ぶわけです。校正用標準液は、業界の符牒で“伊勢の神”と呼ばれるくらい絶対です。その精度は、 $\pm 0.1\%$ から $\pm 0.2\%$ というハイレベル。

一般に、液体の粘度は1℃上がるごとに5～10%減少します。したがって、粘度測定では温度の制御が重要です。粘度測定に関わる方々には、標準的製品の〈粘度—温度関係図〉を作成するようおすすめします。そうすれば、測定時にいちいち温度制御をしなくても、任意の温度での測定値からすぐに換算できます。これは、計測のテクニックです。

また、計量研究所では、圧力 $G$  ( $10^9$ ) Pa領域の潤滑油について、金属球を落下させて、その速度から粘度を測定する落球法に基づく研究も進められています。これは、各種ギア、軸受け、トラクションドライブなどの動力伝達機械システム中で、超高圧環境に置かれる潤滑油粘度を測定するために生じたオーダーです。測定装置も開発され、潤滑油を代表とする実用液体の物性データ系の構築が進められています。

粘度については、本誌の読者諸氏からもリクエストが多数ありましたが、紙数の関係で“さわり”だけ述べさせていただきます。

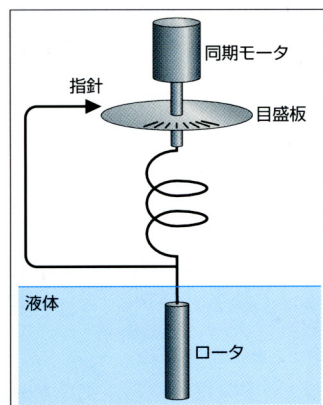


図6 B形回転粘度計の基本構造

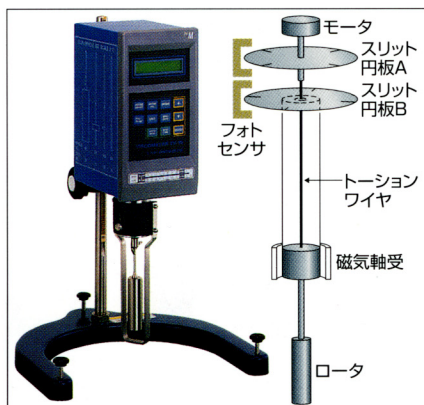


図7 TV-10形粘度計の構造

参考文献・資料／『単位と単位系』高田誠二著（共立出版）、『キッチンで体験レオロジー』尾崎邦宏著（裳華房）、『回転粘度計による粘性測定の実際』（東機産業刊）、『接着の技術誌 第18巻1号』（接着剤・接着評価研究会刊）、『粘度計校正用標準液』（日本規格協会刊）、『計量研ニュース ダイヤモンドアンビルセルによる高圧力下における潤滑油の粘度測定』藤田佳孝著（工業技術院計量研究所刊）