

特集 感性に訴える高分子

レオロジーと感覚



増渕雄一

名古屋大学大学院工学研究科物質科学専攻
[464-8603]名古屋市千種区不老町
教授, 博士(工学).
専門はレオロジー, 高分子物理学.
mas@mp.pse.nagoya-u.ac.jp
rheology.jp/nagoya/

レオロジーは物質の流動/変形特性を評価する学問である。レオロジー評価は人間が物質を触ったり口に含んだりして評価することと本質的に同じである。したがって人間の感性を数値化する手段を与えるものと期待される。本稿ではレオロジーの基礎と、レオロジー量と人間の感性との関係について概説する。

1. レオロジーとは何か

1.1 レオロジーの二面性

レオロジーは身近でありながら、となく難しい、と言われがちである。レオロジーが難しく思われている理由の一つは、レオロジーがもつ二面性にある。レオロジーの元々の意味は物質の流動/変形特性に関する学問、である^{1)~3)}。したがって、レオロジー評価とはわれわれが物質を手でつかみ、あるいは口に入れて、感じる作業そのものである(元レオロジー学会会長の故上田隆宣氏によれば「おさわりの学問」である⁴⁾。これを評価することはとても有用である^{5)~8)}。他方で、レオロジーにはブラウン運動が反映されるため、物質内部のダイナミックスの議論にも使われる⁹⁾。高分子学会のセッションでも「高分子ダイナミックス/レオロジー」と一括りである。これを理解するには分子理論が必要で、簡単でない。最初に述べた流動/変形特性を学ぼうとした人が講演会や講習会に足を運びダイナミックスの話を知ると、難しい、と思うかもしれない。

本稿では、人間の感性に高分子が寄与する例として、レオロジーを人間の感性との関係から紹介したい。ここでは上記のレオロジーの二面性のうちで、流動/変形特性の評価だけ見ることにする。ダイナミックスの評価は、「なぜそのような性質を生み出すのか」を考えるには重要だが、ここでは述べない。

1.2 レオロジーの基礎

本題に入る前に、ごく簡単にレオロジーで評価する量と用語を紹介する。レオロジーでは物質の流動/変形特性を、物質に与える変形と抗力との関係で記述する。ここでは簡単のため、図1のようなせん断変形だけを考える。

レオロジーとは端的に言えばひずみ γ と応力 σ_{xy} がど

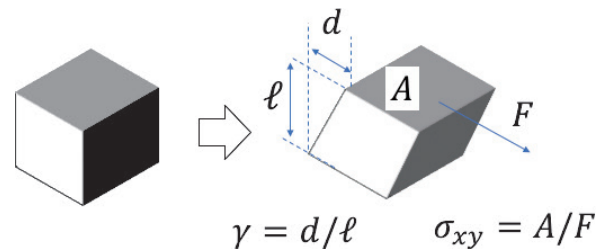


図1 せん断変形におけるひずみ γ と応力 σ_{xy}

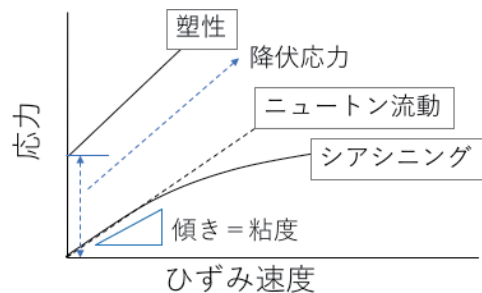


図2 ニュートン流動, シアシニング, 塑性

のような関係にあるかを調べることである。事実、レオロジーの最初期の論文は両者の関係による物質の分類であった¹⁰⁾。また、この関係からさまざまな物性量が定義される。たとえば弾性率は応力をひずみで割ったもの、粘度は応力をひずみ速度(ひずみの時間変化率)で割ったもの、としてそれぞれ定義される。

弾性率や粘度はひずみやひずみ速度に対して一定とは限らない。弾性率がひずみによらないものはフック弾性体、粘度がひずみによらないものはニュートン流体と呼ばれる。図2のように、せん断変形の下で、ひずみ速度をあげたとき粘度が下がる挙動は高分子液体やエマルジョンなどに広く見られるが、このような挙動はシアシニングと呼ばれる。逆に粘度が上がるものはシアシックニングと呼ばれる。塑性体は降伏応力以下の応力では流れないので粘度無限大になるが、降伏応力以上の力では流れる。なおレオロジーの評価には動的粘弾性試験から得られる複素弾性率や複素粘度が用いられることも多いが、ここでは割愛する。

1.3 弾性率と粘度の感覚

自分が触るものがどのくらいの弾性率や粘度をもつ

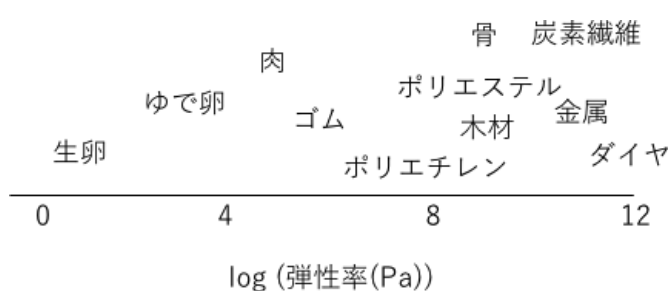


図3 さまざまな物質の弾性率

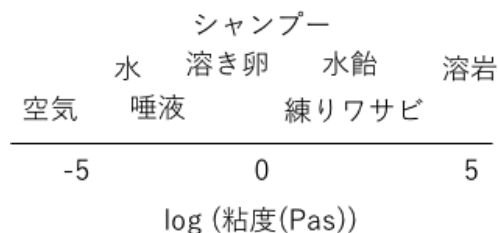


図4 さまざまな物質の粘度 (一部文献¹¹⁾ より)

のかを知っておくとデータに親しみやすい。図3、4に、身の回りのさまざまな物質の弾性率と粘度を大雑把に示した。図3の弾性率を例にして考えてみる。肉の弾性率は $10^5 \sim 10^6$ Paくらいであるから、このあたりのデータを見たら耳たぶを触るか二の腕を掴むかすれば大体の感触がわかる。たとえばこの値は高分子メルトの溶融体が示すゴム状平坦部の弾性率に近い。

人の手のセンサーとしての特徴もレオロジーで考察すると興味深い。ダイヤモンドの弾性率が高いことは知識としては広く共有されている。弾性率で見れば、データ上は、金属はダイヤモンドより柔らかい。しかしわれわれの感触ではこの違いは検知できない。この理由は、われわれの知覚システムにある。われわれの指は肉と骨の変形で物質の硬さを知覚している。対象物が骨より柔らかく、かつ肉より硬いときに、知覚しやすい。この測定レンジには高分子製品であるゴム、プラスチック、繊維が入る。

2. サイコロロジー

2.1 サイコロロジーとは何か

人間の感性とレオロジーの関係を語るにはサイコロロジーは避けて通れない。レオロジー評価はわれわれが物質を手でつかみ、口に入れる作業に近い。しかし人間の感覚は機械とは違う。そこで物質がもつレオロジーと人間の生理的感覚および心理的判断の関係を調べる学問分野、サイコロロジー(psychorheology)が、レオロジー自体の成立から間もなく生まれた。

レオロジー測定の結果は慣例的に対数表示するが、その理由の一つは人の感覚とレオロジーの関係にある。よく知られた研究の一つに、シリコンオイルの実際の粘度 η と人が見たり感じたりする粘さ η_a との関係がベ

き乗則 $\eta \propto \eta_a^2$ で記述できるとするStevensの報告¹²⁾がある。またBlair¹³⁾は、人の左右の手に粘度の異なる物質をもたせ、その違いが正しく判定できるにはどのくらいの違いが必要なかを調べた。その結果、絶対値ではなく相対値で30%の違いが必要であると報告している。

2.2 テクスチャーとオノマトペ

食品分野でおもに用いられるテクスチャーという言葉はサイコロロジーの背景をもつとされている。もともと織物などの質感を意味する言葉だが、食品においては口の中の感覚に影響を与える食品の力学的な性質である。食品の食感を決める要素としてテクスチャーは大きな位置を占めており、Szczesniakら¹⁴⁾によればおよそ33%である。フレーバーがこれに続く24%であることを考えるとかなり大きい。また固体食品は液体食品よりもテクスチャーが重視される傾向にある。

テクスチャーを表現する言語として日本語にはオノマトペがある。日本語はほかの言語に比べて物事の状態を音であらわすオノマトペが非常に多彩かつ語数が多いと言われている。また食感に関する言葉はとくに多いという⁶⁾。レオロジーに関連する言葉も多く、たとえばサラサラは低粘度、ドロドロは高粘度、ふにゃふにゃは低弾性、カチカチは高弾性、あたりは日本語での共通認識であろう。ただし、言葉と感覚の共有は簡単ではない。このため触感や食感の官能評価とレオロジーを結びつけるには注意深く言葉を選ぶ必要がある⁵⁾。

3. レオロジーと感覚

3.1 レオロジーと触感

図3の弾性率から見た簡単な例にとどまらず、レオロジーと触感の関係は深い。よく知られた例はバター塗り心地とレオロジーの関係で、塗りやすいと感じるバターの降伏応力は50~100 kPaの範囲とされる¹⁵⁾。これより高いと硬くて塗り広げられないが、低いと流れてしまい扱いづらい。バターの降伏応力は内在する油脂の針状結晶などによるもので、高温で結晶が溶けると流れる。低脂肪の類似商品では多糖類などで似たような挙動を実現している。マヨネーズやケチャップ、ジャムでも降伏応力は重要である。マヨネーズの降伏応力は油滴の間の水の隔壁によるものである。低カロリーの代替商品ではこの構造が変わってしまうため、多糖類などでマヨネーズに似たレオロジーを作っている。ケチャップやジャムの場合はペクチンによる物理架橋が降伏応力を生み出している。ジャムの仕上げにレモンを入れるのは、酸味を整える目的だけでなく、ペクチンの擬似架橋形成のために酸性の環境が必要なためでもある。

塗料の塗り広げやすさもレオロジーと直接関係して

いる^{4),5)}。多くの塗料はシアシニング性を示す。シアシニングがあると、塗り広げによって液膜の厚みが減少してもあまり力を変えずに塗ることができる。塗布した後の液だれを抑えるには降伏応力があつたほうがよい。これらの特性は高分子添加剤や乳化剤で調整されている。

化粧品や塗り薬は直接手で塗るものであるから、「おさわりの学問」の本領が発揮されやすい分野であろう。実際、化粧品の塗りやすさとレオロジーの関係については多くの研究がなされている^{5),8)}。塗料と同じくシアシニングがあると塗り広げやすく、またクリームのように塑性があると手にとった際などに扱いやすい。また名畑⁸⁾によれば降伏応力が大きいと“コクがある”、小さいと“さらっとした”塗り心地になる。塗り心地には、摩擦の寄与のほうが大きいとする議論もある。また、塗り心地にも影響を与える曳糸性については粘度、表面張力、粘弾性などを考える必要がある¹⁶⁾。

おさわりの、という意味では、玩具も重要な応用例である。古くはいわゆるシリパテが1950年代にアメリカでヒットした。もともとは第二次大戦におけるゴムの不足を補うための合成ゴムを目指した失敗品であった。高分子液体がそのまま玩具になった例としては、1970年代にもスライムのブームがあった。2000年代には大きなパンの形をしたウレタン製のやわらかい携帯ストラップが流行った。このような玩具のレオロジーに関する系統的な研究はほとんどない。ロボットが家庭に進出していく際など、機械の触りごちのチューニングに関連して注目されるかもしれない。

触感を積極的に制御できる材料として、外場でレオロジーが変化する電気粘性流体や磁性流体が研究されてきた。十年ほど前にはテレビゲームのコントローラーへの応用に関する特許が公開されている。日本での研究は近年下火になっているが、仮想現実などのIT技術に関連して盛んになる可能性がある。

3.2 レオロジーと食感

2.2章で述べたように、口に入れたもののレオロジーはわれわれにとって重要である。したがって食品や飲料のレオロジーを適切に制御することで商品開発につなげた例は枚挙にいとまがない。たとえば1990年代に登場し現在もよく売れているゼリー状飲料では、微量の高分子の擬似架橋により降伏応力を生じさせ、独特の食感をつけている。降伏応力はヨーグルトやゼリーを食べたときに感じるハリ感にも関係するとの報告がある¹⁷⁾。口中における粘度の知覚についてはShamaら

の研究¹⁸⁾が有名である。それによれば、口中では応力10~1,000 Pa、ひずみ速度10~1,000 s⁻¹の範囲が知覚される。また粘度が高いものほど遅いひずみ速度、粘度が低いものは高いひずみ断速度で検知される。このような人体の特性はシアシニング性を示す液体に対して鋭敏なようである。口中では、食品に唾液が加わっていくとともに固形分が咀嚼されていくため、食品のレオロジーは時々刻々変化していく。さらに舌と上顎ですりつぶす動作があるため、最終段階ではレオロジーよりもトライボロジーが重要になるとの研究がある¹⁹⁾。

今後重要性が増すと予測される分野は食肉代替物(simulated meat、artificial meat、fake meatなどと呼ばれる)における食感の調整である。たとえばビル・ゲイツも出資し近々日本にも上陸するとされるBeyond Meat社では、見た目も食感もほとんど肉と変わらない植物由来の食品を販売している。現在は食肉生産への不審や嗜好から選ばれており価格も肉の3倍ほど高い。しかし食用肉の生産はさまざまな面で困難を迎えており、近い将来必要とされる量を賄うのは不可能とされている。そこで家畜に餌として与える植物から直接肉(のようなもの)を作れば効率が良いとする考え方が生まれた。このためには、化学的な成分だけでなくテクスチャーも肉に似せることが求められる。タンパク質や多糖類をはじめとする高分子によるレオロジー制御がキーテクノロジーであることは間違いない。

文 献

- 1) “講座・レオロジー”, 日本レオロジー学会編, 高分子刊行会(1992)
- 2) “レオロジーの世界”, 尾崎邦宏, 工業調査会(2004)
- 3) “おもしろレオロジー”, 増淵雄一, 技術評論社(2010)
- 4) “測定から読み解くレオロジーの基礎知識”, 上田隆宜, 日刊工業新聞社(2012)
- 5) “レオロジー工学とその応用技術”, 中江利昭監修, フジ・テクノシステム(2001)
- 6) K. Nishinari, *Nihon Reorogi Gakkaishi*, **31**, 41(2003)
- 7) 西成勝好, 日本バイオレオロジー学会誌, **19**, 3(2005)
- 8) “化粧品のレオロジー”, 名畑嘉之, 産業図書(2015)
- 9) “基礎高分子科学”, 高分子学会編, 東京化学同人(2006)
- 10) G. W. S. Blair, *Nature*, **149**, 197(1942)
- 11) “食品のテクスチャー評価の標準化”, 森 友彦, 川端晶子編, 光琳,(1997)
- 12) S. S. Stevens and M. Guirao, *Science*, **144**, 1157(1964)
- 13) G. W. S. Blair and F. M. V. Coppen, *Proc. R. Soc. B. Biol. Sci.*, **128**, 109(1939)
- 14) A. S. Szczesniak, *J. Texture Stud.*, **2**, 196(1971)
- 15) A. J. Wright, *et al.*, *J. Food Sci.*, **66**, 1056(2008)
- 16) G. H. McKinley, *Rheol. Rev.*, **2005**, 1(2005)
- 17) E. A. Foegeding, *et al.*, *J. Texture Stud.*, **42**, 103(2011)
- 18) F. Shama, *et al.*, *J. Texture Stud.*, **4**, 102(1973)
- 19) J. Chen and J. R. Stokes, *Trends Food Sci. Technol.*, **25**, 4(2012)