

レオロジーの基礎 I

－ひずみ・応力の定義と、ひずみの代表的な与え方－

キーワード： レオロジー、ひずみ、応力、伸長、せん断、定常流動、動的ひずみ

はじめに

レオロジーは、物質の変形や流動に関する技術領域であり、物質自身の力学物性のみならず、素材としての加工性、輸送性、ならびに製品としての使用感等とも密接に関連します。また、対象となる物質も幅広く、プラスチック、ゴムなどの固体高分子材料から、塗料や潤滑油、化粧品、はちみつ、バターに至るまで、さまざまです。さらに、レオロジー特性を評価する方法も多種多様です。

このような対象および評価方法の多様性は、レオロジーの奥深さ、興味深さを示唆するものですが、その反面、親しみ難さ（理解し難さ）の要因になっているとも考えられます。

レオロジー特性の評価とは、極論すれば、「ひずみ－応力－時間」の関係性を調べることと言えます。従って、ひずみおよび応力の定義を理解するとともに、ひずみの代表的な与え方を知ることは、レオロジーに関する知識を深める上での基礎となります。

ここでは、まず、主要な変形様式に対応した「ひずみ」および「応力」の定義について述べます。次に、レオロジーにおけるひずみの代表的な与え方である「定常流動」と「動的ひずみ」を紹介します。

ひずみ・応力と変形様式

レオロジーにおいて、ひずみは、変形の程度を表す物理量（無単位）です。また、応力は、大きさ、方向、および作用面が規定された単位面積当たりの力であり、圧力と同じ単位（ $\text{N/m}^2 = \text{Pa}$ ）で表されます。

ひずみおよび応力の定義は、変形様式により異なります。ここでは、伸長変形（引張り変形）とせん断変形（ずり変形）について、それぞれの変形におけるひずみおよび応力の定義を示します。

(1) 伸長変形におけるひずみ・応力

伸長変形とは、文字通り、物質を伸ばして

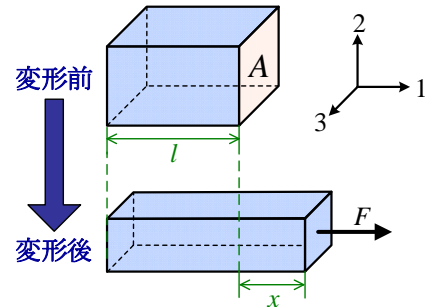


図1 伸長変形

長くする変形様式です。例えば、ゴムひもを引き伸ばすようなイメージです。

図1に示すように、直方体状の物質に対し、1軸方向に伸長変形を加えた場合を考えます。この時、物質に加わった変形の程度を示す指標が伸長ひずみ（ ϵ ）であり、式①で定義されます。式①に示すとおり、 ϵ は、直方体の1軸方向の変形量〔 x (m)〕を直方体の変形前の長さ〔 l (m)〕で除したものです。

一方、伸長変形が加わった物質には応力が発生しており、一般的なレオロジー特性評価においては、特に、直方体の右面に作用する1軸方向の応力〔 σ_E (Pa)〕に着目します。 σ_E は、直方体の右面に作用する1軸方向の力〔 F (N)〕を直方体右面の面積〔 A (m²)〕で除したものの（式②）です。

$$\epsilon = x/l \dots\dots\dots \text{①}$$

$$\sigma_E = F/A \dots\dots\dots \text{②}$$

(2) せん断変形におけるひずみ・応力

せん断変形とは、図2に示すように、直方体の下面を固定したまま、上面を1軸方向にずらすような変形様式です。

図2において、せん断ひずみ（ γ ）は式③で定義され、直方体上面の1軸方向の変位量〔 x (m)〕を直方体の高さ〔 h (m)〕で除した無単位量です。

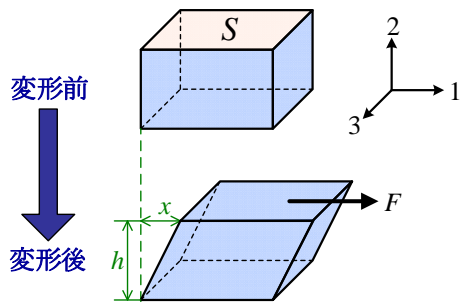


図1 せん断変形

また、せん断応力 [σ_s (Pa)] は、直方体の上面に作用する 1 軸方向の応力であり、式④のとおり、直方体の上面に作用する 1 軸方向の力 [F (N)] を直方体上面の面積 [S (m²)] で除すことで求められます。

$$\gamma = x/h \dots\dots\dots ③$$

$$\sigma_s = F/S \dots\dots\dots ④$$

定常流動

せん断変形を例に、定常流動における時間とひずみの関係について述べます。図 3 (a)に示すとおり、定常流動とは、ある時間以降 [$t \geq 0$ (s)]、一定の割合でひずみを増加させ続けることを指します。

なお、図 3 (b)に示すひずみ速度 [$\dot{\gamma}$ (s⁻¹)] とは、ひずみが時間変化する割合、つまりひずみの時間微分 (式⑤) です。よって、定常流動において、ひずみ速度は $t \geq 0$ (s) で一定の値を示し、図 3 (a)の $t \geq 0$ (s)における直線の傾きが、ひずみ速度に相当します。

$$\dot{\gamma} = d\gamma/dt \dots\dots\dots ⑤$$

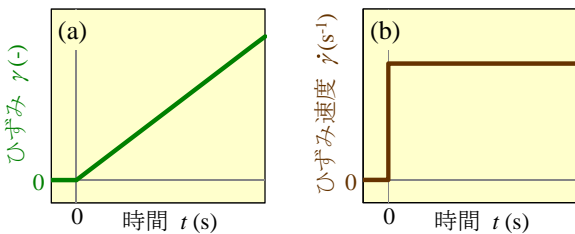


図3 定常流動における (a)ひずみと時間の関係、(b)ひずみ速度と時間の関係

動的ひずみ

定常流動と同様、せん断変形を例に、動的

ひずみについて述べます。なお、通常の破壊試験 (引張り試験、曲げ試験等) において、「動的」という用語は「高速変形」を意味しますが、レオロジーにおける「動的ひずみ」とは、図 4 (a)および式⑥に示すような、正弦波 (sin 波) 状のひずみを繰り返し与えることを指します。式⑥において、 γ_0 はひずみ振幅 (無単位) であり、 ω は角振動数 (単位: s⁻¹) です。

また、式⑤および⑥より、動的ひずみにおけるひずみ速度は、式⑦および図 4 (b)のように表すことができます。従って、正弦波状のひずみを与えた時、ひずみ速度は余弦波 (cos 波) 状になります。

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \sin \omega t \dots\dots\dots ⑥$$

$$\dot{\gamma} = d\gamma/dt = \gamma_0 \omega \cdot \cos \omega t \dots\dots\dots ⑦$$

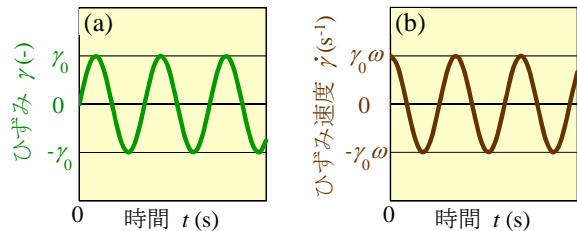


図4 動的ひずみにおける (a)ひずみと時間の関係、(b)ひずみ速度と時間の関係

おわりに

本シートでは、レオロジーの基礎として、ひずみおよび応力の定義と、ひずみの代表的な与え方について解説しました。本シートが初めてレオロジーに触れられる方の参考になれば幸いです。

なお、近年、レオロジーに関するわかりやすい解説書¹⁾⁻³⁾が幾つか出版されていますので、それらもご参照下さい。

参考文献

- 1) 上田隆宣: 測定から読み解くレオロジーの基礎知識, 日刊工業新聞社 (2012).
- 2) 尾崎邦宏: レオロジーの世界, 森北出版 (2011).
- 3) 増淵雄一: おもしろレオロジー, 技術評論社 (2010).