

レオロジーの基礎 II

—Hooke 弾性、Newton 粘性—

キーワード： レオロジー、高分子、弾性、粘性、粘弾性、ひずみ、応力

はじめに

レオロジーとは、物質の変形や流動に関する技術領域です。レオロジーが対象とする物質は実にさまざまですが、主要な対象として、プラスチックやゴムに代表される高分子材料が挙げられます。これは、高分子材料が本質的に有している粘弾性が、主要なレオロジー特性の一つであり、材料としての成形性や製品の品質に大きく影響するためです。

粘弾性とは、弾性と粘性とを併せ持った性質です。従って、レオロジーに関する知識を深めるためには、粘弾性の基礎となる弾性および粘性について理解することが必要です。

ここでは、前報¹⁾に引き続き、レオロジーの基礎的な概念として、理想的な弾性(Hooke弾性)および粘性(Newton粘性)について、わかりやすく解説します。

Hooke 弾性

図1に示すように、Hooke弾性を示す物質(Hooke弾性体)においては、与えたひずみ $[\gamma(-)]$ に比例した応力 $[\sigma_s(\text{Pa})]$ が発生しま

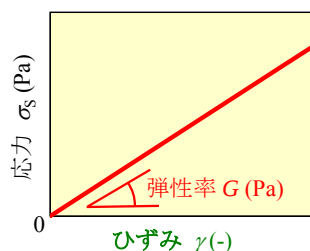


図1 Hooke弾性体におけるひずみと応力

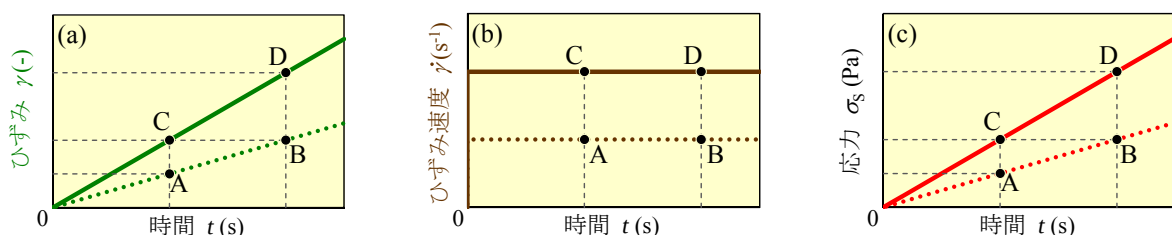


図2 定常流動における (a) ひずみと時間の関係、(b) ひずみ速度と時間の関係、および (c) Hooke弾性体の応力と時間の関係

す。ここで、応力とひずみの比例係数が弾性率 $[G(\text{Pa})]$ です。

Hooke弾性は、いわゆるバネでモデル化されます。バネを自然長から引き伸ばした時、バネの抵抗力は伸びの大きさと比例関係にあり、大きく伸ばすほど抵抗力が大きくなるイメージです。また、上記の弾性率は、バネの剛さに相当します。

ここで重要なのは、バネを引き伸ばすことで発生する抵抗力は、伸びの大きさ(変位量)に比例しますが、引き伸ばす速さ(変位速度)には依存しないということです。速く引き伸ばしても、ゆっくり引き伸ばしても、伸びの大きさが同じであれば、抵抗力は同じです。

上述のバネのイメージを踏まえ、Hooke弾性体に対し、前報¹⁾で紹介した定常流動を与えた場合を考えます。図2(a)および(b)に示したような、ひずみ速度の異なる2種類の定常流動(点線：低ひずみ速度、実線：高ひずみ速度)をHooke弾性体に与えると、図2中のA~Dにおけるひずみおよびひずみ速度の大小関係は、式①および②のようになります。また、図2(c)に示すとおり、Hooke弾性体の応力は、ひずみ同様の時間変化を示し、その大小関係(式③)もひずみと一致します。ただし、Hooke弾性体の応力は、ひずみ速度の大小とは無関係です。

$$\text{ひずみ} : A < B = C < D \cdots \cdots \text{①}$$

$$\text{ひずみ速度} : A = B < C = D \cdots \cdots \text{②}$$

$$\text{応力} : A < B = C < D \cdots \cdots \text{③}$$

このように、応力がひずみに依存（比例）し、ひずみ速度には依存しないことは、Hooke 弾性体の重要な特徴の一つです。

Newton 粘性

Newton 粘性を示す物質（Newton 粘性体）においては、図 3 に示すように、与えたひずみ速度 $[\dot{\gamma} \text{ (s}^{-1}\text{)}]$ と応力 $[\sigma_s \text{ (Pa)}]$ は比例関係にあります。また、その比例係数が粘度 $[\eta \text{ (Pa}\cdot\text{s)}]$ です。

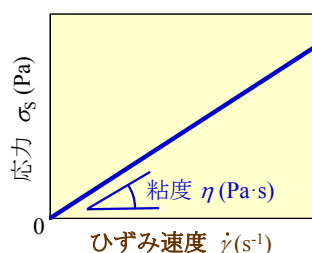


図 3 Newton 粘性体におけるひずみ速度と応力

Newton 粘性は、一般に、ダッシュポットで表されます。しかし、ここでは、よりわかりやすく、竹鉄砲（竹筒で作った水鉄砲）を例に、Newton 粘性について説明します。

図 4 に示すように、竹鉄砲のピストンを動かし、竹筒中に水を吸引する時、手に感じる抵抗力はピストンを動かす速さに比例し、速く動かすほど抵抗力が大きくなります。この抵抗力の起源が粘性であり、ピストンを動かす速さと抵抗力との比例係数は、水の粘度に依存します。

ここで、ピストンを動かすことで発生する抵抗力は、動かす速さ（変位速度）に比例し



図 4 竹鉄砲への水の吸引

ますが、動かした量（変位量）には依存しません。言い換えると、一定速度でピストンを動かすのであれば、動かし始めてすぐの段階（変位量：小）でも、動かし終える直前（変位量：大）でも、抵抗力は同じです。このように、Newton 粘性における「変位量－変位速度－抵抗力」の関係は、Hooke 弾性におけるそれと表裏の関係と言えます。

ここで、前述の Hooke 弾性体と同様、Newton 粘性体に対し、図 2 (a)および(b)に示した 2 種類の定常流動を与えた場合を考えます。当然ながら、A～D におけるひずみおよびひずみ速度の大小関係は、式①および②と同じです。ただし、図 5 に示すとおり、Newton 粘性体の応力は、ひずみではなく、ひずみ速度と同様の時間変化を示し、その大小関係(式④)も、ひずみではなく、ひずみ速度と一致します。

$$\text{応力} : A = B < C = D \cdots \cdots \text{④}$$

このように、Newton 粘性体は、Hooke 弾性体と異なる特徴を有し、応力はひずみ速度に依存（比例）しますが、ひずみには依存しません。

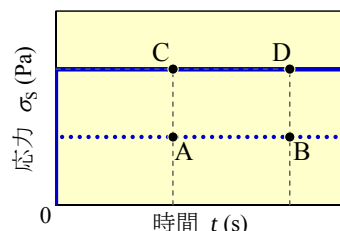


図 5 定常流動における Newton 粘性体の応力と時間の関係

おわりに

本シートでは、レオロジーにおける粘弾性の基礎として、Hooke 弾性と Newton 粘性について解説しました。本シートがレオロジーに親しむきっかけになれば幸いです。

参考文献

- 1) 西村正樹：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－，地方独立行政法人大阪府立産業技術総合研究所 Technical Sheet, No.15013 (2016)。