

複雑な事象について

佐々木 裕¹

東亜合成株式会社

¹hiroshi_sasaki@mail.toagosei.co.jp

Outline

- ① 流れるということについて、もう少し
 - ニュートン流体を見直しましょう
 - 流動を表すモデル
 - 局所的な応力と粘度
- ② 非ニュートン流体
 - 身近な液体とその分類
 - 非ニュートン流体とは
 - 非ニュートン性の発現
- ③ 実事象についても少しだけ考えましょう。
 - 簡単な分類
 - シアシニングについて
 - シアシッキングについて

この章でのお話

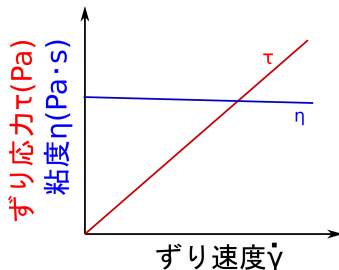
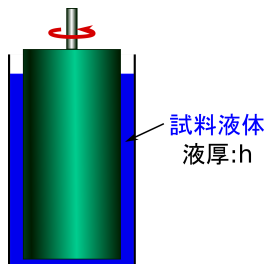
この章では、「複雑な事象」についての議論を進めていきます。

以前にも述べましたように、実際の事象は非常に複雑なものとなっています。この複雑な現象を考察するために、最もシンプルなニュートン流体の流動を表すモデルを振り返った上で、それとの相違という形で考えていきましょう。

- 流れるということについて、もう少し。
- 非ニュートン流体とは？
- 実事象についても少しだけ考えましょう。

- ① 流れるということについて、もう少し
 - ニュートン流体を見直しましょう
 - 流動を表すモデル
 - 局所的な応力と粘度
- ② 非ニュートン流体
 - 身近な液体とその分類
 - 非ニュートン流体とは
 - 非ニュートン性の発現
- ③ 実事象についても少しだけ考えましょう。
 - 簡単な分類
 - シアシニングについて
 - シアシックニングについて

ニュートンの法則



ニュートンの法則

せん断応力 = 粘度 \times せん断速度

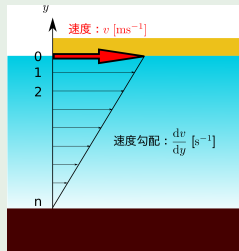
$$\tau = \eta \dot{\gamma}$$

- ずり応力はずり速度に比例。
- 比例定数の粘度は、ずり速度によらずに一定。

液体の流動を表すモデル

水面に板を浮かべたモデル

- 水深方向に $n+1$ 層に分割
 - 水面の板との境目を 0
 - 水底との境目を n
- 液体の内部では、
 - 水深に応じて流れる速度の分布
 - 最も単純な状態：
速度勾配が一定



液体を考えるとときに重要な事項

- 固体と接している液体はその相対的な移動速度が同じ
 - 移動する板と接している層 0 は板と同じ速度 v で流れ、
 - 地面に接している層 n は流れない。

液体の流動について

- 評価の対象である液体の内部では、
 - 水深に応じて、流れる速度の分布が生じる
- 液体の流れる速度は、
 - 水深 y の関数として $v(y)$
 - 速度勾配と呼ばれ、その単位は $[s^{-1}]$

速度勾配は、せん断変形を記述する無次元量であるせん断ひずみ γ の時間変化（微分） \Leftrightarrow せん断速度

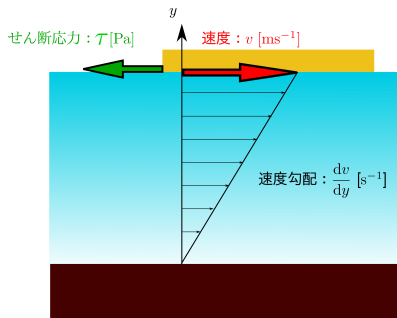
$$\frac{dv}{dy} = \dot{\gamma} [s^{-1}]$$

液体の力学モデル

- せん断速度 $\dot{\gamma}$ に比例し、
- せん断応力 τ が生じ、
- 比例定数が粘度 η

$$\tau = \eta \dot{\gamma}$$

上記の比例関係が成立する液体がニュートン流体

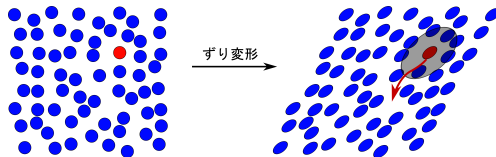


注意点

- 速度勾配に従って、各層ごとにせん断応力が発生
- その値は、**局所的なせん断速度に比例して変化。**
- 逆に言えば、**せん断速度によらずに粘度が一定。**

液体の応力とは？（再掲）

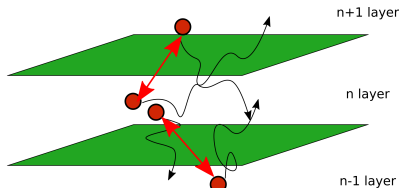
- マクロな変形（例えば、ずり変形）を付与
 - ミクロにも粒子近傍の並び方が変化
- 一粒子に着目すると、
 - その粒子を取り巻く周りの粒子とのポテンシャル場が変化して、「歪んだかご」
 - 「歪んだかご」の中で、居心地が悪くなる。
 - その結果として局所的な応力が発現
- その積分値として、マクロな応力
 - 「歪んだかご」からの脱出 \Leftrightarrow ミクロな応力が消失
 - マクロにも流動



粘度が「せん断速度」に依存しない理由

せん断応力の由来

- 仮想的な面で生じるせん断応力の由来は、
 - 面を通しての粒子の相互作用に起因
 - 相対的な速度差に、比例する
- この相互作用は、
 - 「歪んだかご」からの脱出頻度にも比例
 - 多体の相互作用が、「居心地の悪さ」



ニュートン流体では

- 隣接する粒子間の相互作用が、せん断速度やせん断応力に非依存。
- 結果、粘度が一定。
- ただし、適正な範囲で。

少しだけ大粒子が入った場合

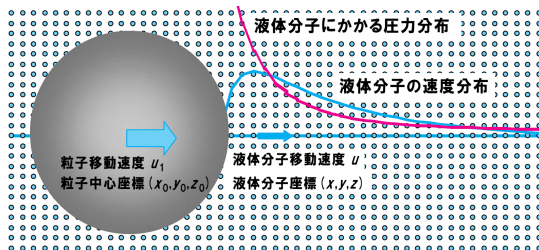
- ニュートン流体に球状粒子が入った場合。
 - アインシュタインが理論的に導出
 - 剛直な球を希薄に懸濁した溶液
- 仮定条件
 - 球の半径は、液体粒子より遥かに大きい。
 - 球状粒子間の相互作用はない。
 - 液体粒子は球状粒子に固着している。
- 下式を使って、砂糖分子の大きさと分子数を概算
 - 砂糖水の濃度と粘度との関係から求めた。

アインシュタインの粘度式

$$\eta = \eta_0(1 + 2.5\phi)$$

η_0 は液体の粘度、 ϕ は球状粒子の体積分率

アインシュタインの粘度式



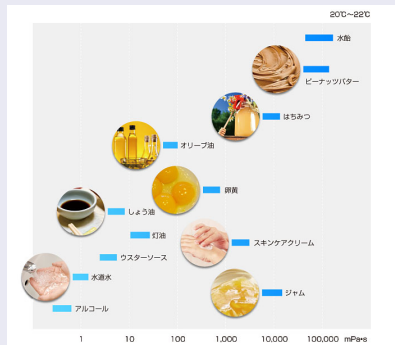
アインシュタインの水中を移動する砂糖粒子モデル (大球：砂糖分子，小球：水分子)。

- ① すべての水分子の水平変位は、その相対位置を保ちながら起こる。
- ② 水分子の回転は、その相対位置を保ちながら起こる。
- ③ 水の膨張・収縮は三次元で起こる。

- ① 流れるということについて、もう少し
 - ニュートン流体を見直しましょう
 - 流動を表すモデル
 - 局所的な応力と粘度
- ② 非ニュートン流体
 - 身近な液体とその分類
 - 非ニュートン流体とは
 - 非ニュートン性の発現
- ③ 実事象についても少しだけ考えましょう。
 - 簡単な分類
 - シアシニングについて
 - シアシックニングについて

身近な液体

身の回りにある各種の液体（流れるもの）の比較

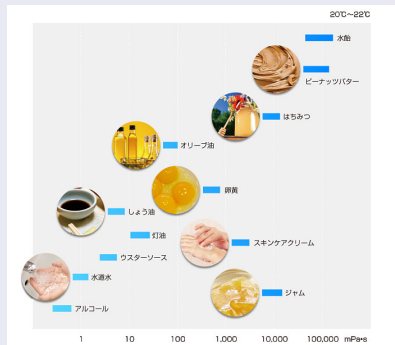


この絵のサイトへのリンク

- 一般的には左図のように、流れやすさを一覧に表す。
- 一応は、粘度の順番で並べて比較している。
- それで十分なのだろうか？

身近な液体

身の回りにおける各種の液体（流れるもの）の比較



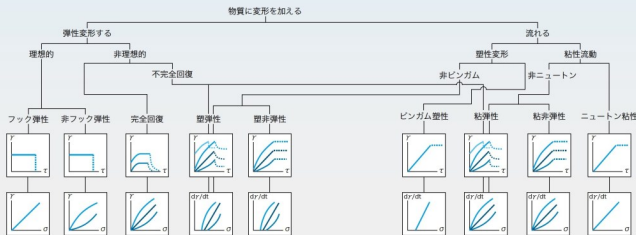
この絵のサイトへのリンク

- 一般的には左図のように、流れやすさを一覧に表す。
- 一応は、粘度の順番で並べて比較している。
- それで十分なのだろうか？
- **実は、測り方によっては順位は前後する場合も多い。**

各種の応答特性の分類

ビンガム氏が作成した分類図

- 図の左側が弾性応答で、右側が流動特性
- 単純に二分されるわけでもなく、粘性と弾性を併せ持ったものが多く存在。

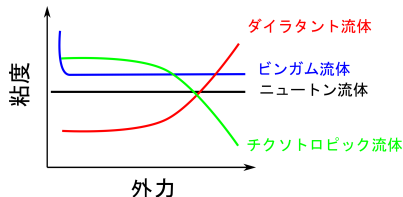
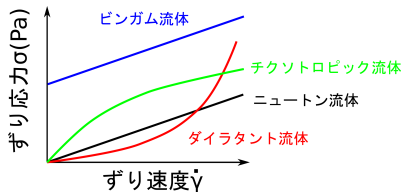


Nature 1942 v149-3790, p702
この絵のサイトへのリンク

非ニュートン流体とは

非ニュートン流体とは？

- 簡単に言えば、ニュートン流動と異なる流動特性を示すもの。
 - ずり応力が線形ではない。
 - 変形状態（ずり速度や加える力が変化）に依存して、粘度が変化する。
- その原因は多数あるが、基本的に内部に構造を有する物質で生じる。



非ニュートン性の発現は？

非ニュートン性発現の直感的理解

- 物質の内部構造に由来して応力（粘度）が増加、減少
 - 物質の内部構造に由来する特徴的時間が存在
 - 内部構造が崩壊、再構築するための特徴的な時間
- 外部からの変形に関わる時間（レート）との比が大事
 - 物質中の内部構造が持つ特徴的な時間よりも短い時間（速い速度）で変形
 - 内部構造が変化するため巨視的な粘度が変化
 - **非ニュートン性が発現**
 - 内部の特徴時間よりゆっくり変形
 - その範囲では、粘度は変形速度に依存しない。
 - ニュートニアンとして応答。

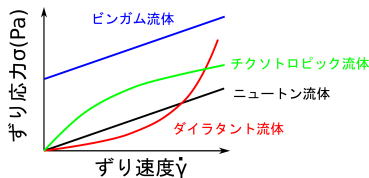
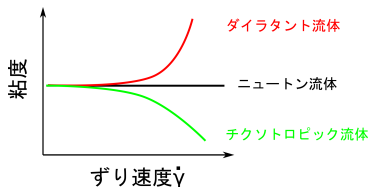
様々なせん断速度

以下に様々な工程における大体のせん断速度の範囲を、簡単にまとめた。

工程	せん断速度
粒子の沈降	$10^{-6} \sim 10^{-3}$
表面張力によるレベリング	$10^{-2} \sim 10^{-1}$
重力による液垂れ	$10^{-1} \sim 10^1$
押し出し	$10^0 \sim 10^3$
ボトルからの流れ出し	$10^1 \sim 10^2$
噛む、飲む	$10^1 \sim 10^2$
混合攪拌	$10^1 \sim 10^3$
塗工	$10^0 \sim 10^4$

- ① 流れるということについて、もう少し
 - ニュートン流体を見直しましょう
 - 流動を表すモデル
 - 局所的な応力と粘度
- ② 非ニュートン流体
 - 身近な液体とその分類
 - 非ニュートン流体とは
 - 非ニュートン性の発現
- ③ 実事象についても少しだけ考えましょう。
 - 簡単な分類
 - シアシニングについて
 - シアシックニングについて

シアシニングとシアシックニング



- ひずみ速度の変化に対して、以下の2つに大まかに分類

- シア・シニング

- チクソトロピック流体
- ずり速度の増加により粘度が低下

- シア・シックニング

- ダイラタント流体
- ずり速度の増加により粘度が上昇

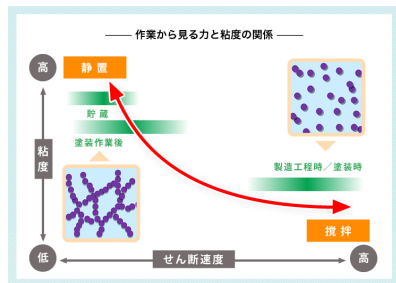
- (参考) ニュートン流体

- 粘度がずり速度に依存しない。
- ずり速度が上がれば、応力は増加することに注意。

シアシニングについて

シア・シニングの挙動

- 静置状態では内部構造が形成されて高粘度。
- 高せん断速度が付与されることで、
 - 内部構造が崩壊して粘度が低下。
- せん断速度の低下により、粘度が再上昇。

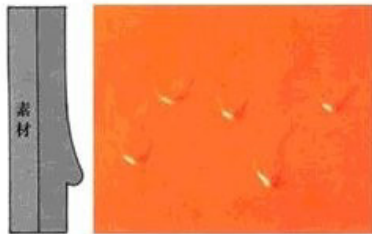


この画像のサイト

塗膜の液垂れ防止

塗膜の液垂れ

- 塗布後に、
- 内部構造の再形成が遅くて、
- 塗料の粘度が低すぎた場合、
- 塗膜の液垂れ発生



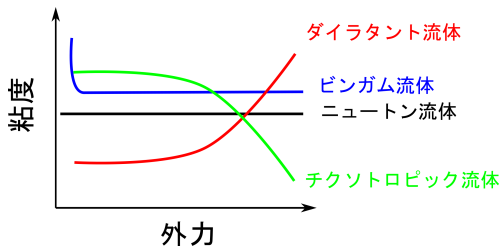
Copyright© O-WELL Co.,Ltd. All rights reserved

この画像のサイト

設計のポイント

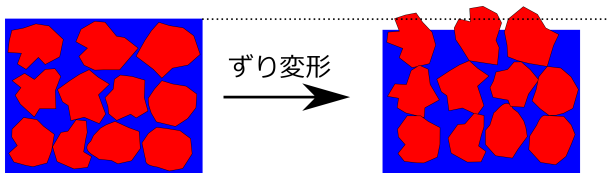
具体的には、生地状態に復帰したときの内部構造の再構築に必要な特徴的な時間を短くすることが大事になります。

ビンガム流体



- 降伏値を有する流体
 - ある一定の力がかかるまでは固体。
 - 降伏値を超えると流動
- チクソトロピック流体とほぼ類似の挙動
 - 内部構造が一旦崩壊すると、相互作用が一気に小さく。
- 実例
 - バター
 - 歯磨き粉

ダイラタンシーについて



適正な体積分率の粒子は、
水中で自由に運動しているので、
全体としては流動できる液体。

粒子の充填状態が変化し、
粒子の見かけの体積が増加。
表面の水が内部に引き込まれ、
全体として固体化。

- おなじ大きさの球形粒子の水を吸った状態を考える。
- 最密充填では空隙率は 26 % で、これ以上の水があれば流動。
- 急激な外力により単純立方格子になると空隙率は 48 % になるため、水は全部内部へ吸いこまれる。
- こすり合う粒子ができて体積が幾分膨張、もろい固体となる。

おまけ



スイーツとダイラタンシー



水によるエネルギー散逸