

初心者のための化学工学入門 2. 流体工学入門

講師 宮本 公明

<講義概要>

化学プラントでは気体や液体などの流体を扱います。また、機能性材料製造工程では流体を扱うことも多く、このような流れの挙動を扱う流体工学は化学工学の基礎的な単位操作です。

この講義では、流れを支配する圧力と粘度について理解することで、配管径、配管部品の流量に及ぼす効果や必要なポンプ動力の算出法を学びます。まず最初に、粘度の持つ意味と測定法を説明した後、流れに乱れが生じるかどうかを判別するレイノルズ数の計算を学びます。さらに、円管内の流れの流速分布や圧力損失、与えられた流路で所定の流量を得るためのポンプ動力などを計算する手法を解説します。

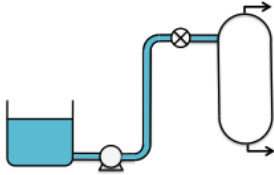
講義を通して、式の理解を深め計算の間違いを防ぐため、それぞれの式に現れる数の単位と導出される値の単位算出を明示しました。また、各ステップごとの簡単な演習と解説を行います。

<講義の主な内容>

1. 序
化学産業における流体工学
2. 流体工学の基本
流体工学の用語と連続の式 →演習
3. レオロジー
粘度の意味とニュートン流体、粘度の測定法
4. 層流と乱流
レイノルズ数 →演習
5. 流れの基礎式
運動量保存則
6. 円管内の流れ
管内層流の速度分布とハーゲン・ポアズイユの式
7. 流れのエネルギー収支
ベルヌーイの式 →演習
8. 管摩擦と圧力損失
ファニングの式 →演習
9. 機械的エネルギー
損失エネルギーの計算 →演習
10. 流れの計測
マンオメーター、ピトー管、オリフィスの原理とその他の測定装置 →演習

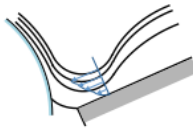
化学産業における流体力学

化学プラントでは



マクロな流れのエネルギー収支

塗布産業では



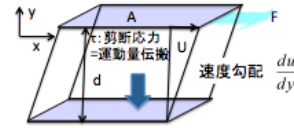
ミクロな圧力/剪断力の収支
速度分布の変化

装置設計の仕様を決めたい

⇒ 「流れはどんな因子に左右されるか？」

⇒ 流体力学で答える

粘度と剪断応力



τ: 剪断応力=x方向の運動による抵抗(x方向)
=y方向に伝搬する運動量 (ニュートンの粘性法則)

$$\tau = \frac{F}{A} = -\mu \frac{du}{dy} = -\mu \left(\frac{U}{d} \right)$$

→ 直線速度分布の場合

単位

$$\frac{[N \cdot m^{-2}]}{[Pa]} = \frac{[N]}{[m^2]} = [Pa \cdot s] \times \frac{[m \cdot s^{-1}]}{[m]} \quad [Pa \cdot s] = \frac{[N][s]}{[m^2]} = \frac{[kg][m][s]}{[s^2][m^2]} = \frac{[kg]}{[m][s]}$$

参考

レイノルズ数1

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} = \frac{\text{慣性力}}{\text{粘性力}}$$

ρ [kg・m⁻³] 密度 u [m・s⁻¹] 流速
D [m] 管内径 μ [kg・m⁻¹・s⁻¹] 粘度

レイノルズ数は無次元数

$$Re = \frac{[kg \cdot m^{-3}] [m \cdot s^{-1}] [m]}{[kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]} = \frac{[kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]}{[kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]} = [-]$$

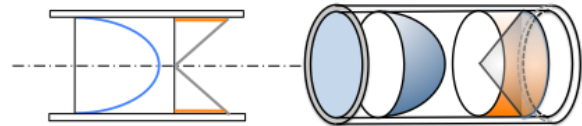
$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} = \frac{\rho u^2}{\mu \left(\frac{u}{D} \right)} = \frac{\text{運動エネルギーの作る動圧}}{\text{粘性による剪断応力}}$$

レイノルズ数: 粘性と運動のどちらが強いを示す

管内層流の速度分布4

円管を縦割りにして速度分布
剪断応力分布を見ると

もともとは



速度分布 剪断応力分布(2D) 速度分布 剪断応力分布(3D)

これが ニュートン流体 定常円管流の速度分布/剪断応力分布
速度は壁でゼロ、中央で最大 剪断応力は中央でゼロ、壁で最大

ファニングの式2

$$\left. \begin{aligned} \tau_w &= f \cdot \frac{1}{2} \rho \bar{u}^2 \\ \tau_w &= \frac{1}{4} \frac{\Delta P}{L} D \end{aligned} \right\} \Delta P = 4f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{1}{2} \rho \bar{u}^2$$

$$\Delta P: \text{圧力損失 [Pa]} = \left[\frac{N \cdot m^{-2}}{m^2} \right] = \left[\frac{N \cdot m}{m^3} \right] = \left[\frac{J}{m^3} \right]$$

単位体積あたりの損失エネルギー
= 流れの運動エネルギー × 長さの効果 × 係数

層流の場合: ハーゲン-ポアズイユ式と比較

$$\Delta P = \frac{8\mu L Q}{\pi R^4} = \frac{32\mu L \bar{u}}{D^3} = 4 \cdot \frac{16}{\rho \bar{u} D / \mu} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{1}{2} \rho \bar{u}^2$$

すなわち $f = \frac{16}{\rho \bar{u} D / \mu} = \frac{16}{Re}$

乱流の場合: 平滑管に対するブラジウスの式 $f = 0.0791 Re^{-1/4}$

圧縮性流体(ガス)の場合上記の取り扱いと異なる

機械的エネルギーの収支2

収支式

$$\frac{1}{2} u_A^2 + g z_A + \frac{P_A}{\rho} + W = \frac{1}{2} u_B^2 + g z_B + \frac{P_B}{\rho} + F$$

速度エネ 位置エネ 圧力エネ 仕事 速度エネ 位置エネ 圧力エネ 損失エネ
[J・kg⁻¹] [J・kg⁻¹] [J・kg⁻¹] [J・kg⁻¹] [J・kg⁻¹] [J・kg⁻¹] [J・kg⁻¹] [J・kg⁻¹]

W = Δ(速度エネルギー) + Δ(位置エネルギー) + Δ(圧力エネルギー) + F

損失エネルギーは摩擦によって失うエネルギー [J・kg⁻¹]

$$F = \frac{\Delta P}{\rho} = 4f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{1}{2} \bar{u}^2$$

所要動力(仕事率: 単位時間あたりの仕事)

= 損失エネルギー [J・kg⁻¹] × 単位時間の質量流量 [kg・s⁻¹]

$$W_p = \frac{\rho Q W}{\eta} \quad \eta \text{は効率}$$

$$[J \cdot s^{-1}] = [kg \cdot m^{-3}] [m^3 \cdot s^{-1}] [J \cdot kg^{-1}] / [-] = [W]$$