

～ 流体力学の基礎 ～
第6回
流体摩擦および境界層1

OpenFOAM 勉強会 for beginner
2012年04月22日(日)

講習会のスケジュール概要 (あくまでも現時点での予定です)

OpenFOAM
勉強会
for beginner

流体力学の基礎		
第 1回目	2011.09	流体について
第 2回目	2011.10	流体静力学
第 3回目	2012.01	流体運動の基礎理論1
第 4回目	2012.02	流体運動の基礎理論2
第 5回目	2012.03	流体運動の基礎理論3
第 6回目	2012.04	流体摩擦および境界層1
第 7回目	2012.05	流体摩擦および境界層2
第 8回目	2012.06	流体摩擦および境界層3
第 9回目	2012.07	流体抵抗

これまでのお話

これまでのお話

質量保存 : 連続の式
運動量保存 : オイラーの運動方程式
エネルギー保存 : ベルヌーイの定理

ベルヌーイの定理

想定している流体 = 定常、非粘性流体

今回のお話

OpenFOAM
勉強会
for beginner

管内の流れ

まっすぐに滑らかな円管内でも、必ずエネルギーの損失が存在する。

ベルヌーイの定理

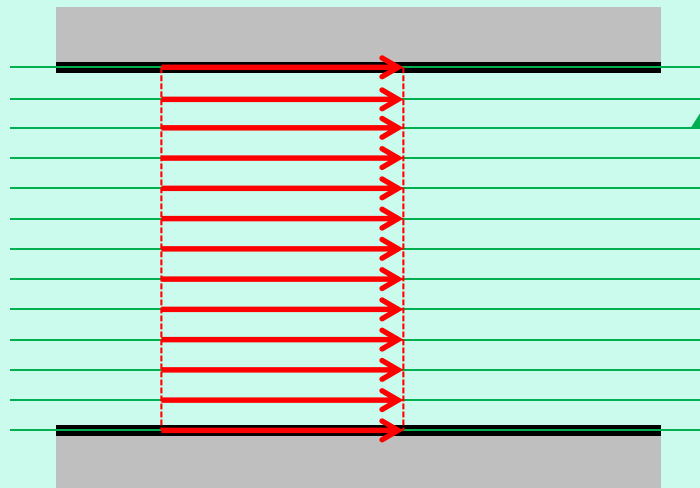
$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \Delta h_f$$

摩擦損失ヘッド

- ・摩擦損失の原因である粘性の概要を説明します。
- ・また、レイノルズ数を紹介します。
- ・管内摩擦損失ヘッドについて少し触れます。

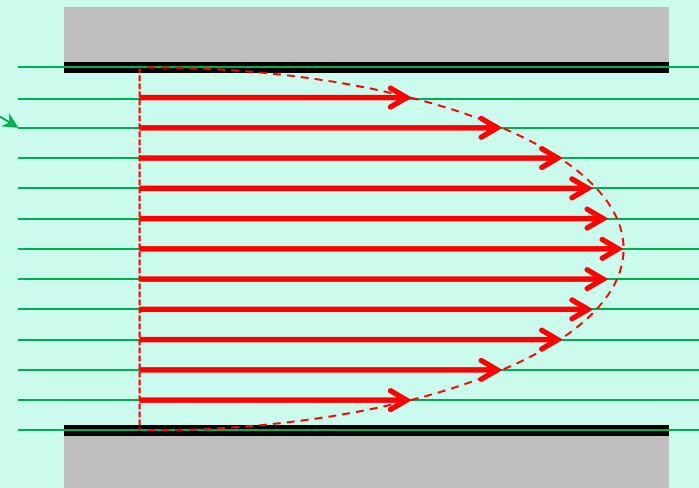
管内の流れはどうなっているか

ベルヌーイの定理が想定する
流れの状態



管内には、流線に沿って一様な
流速が発生

実際の流れの状態の想定図(層流)



管内の位置により、流速が異なる

壁面側では流体は壁に付着している

流体に作用するせん断応力

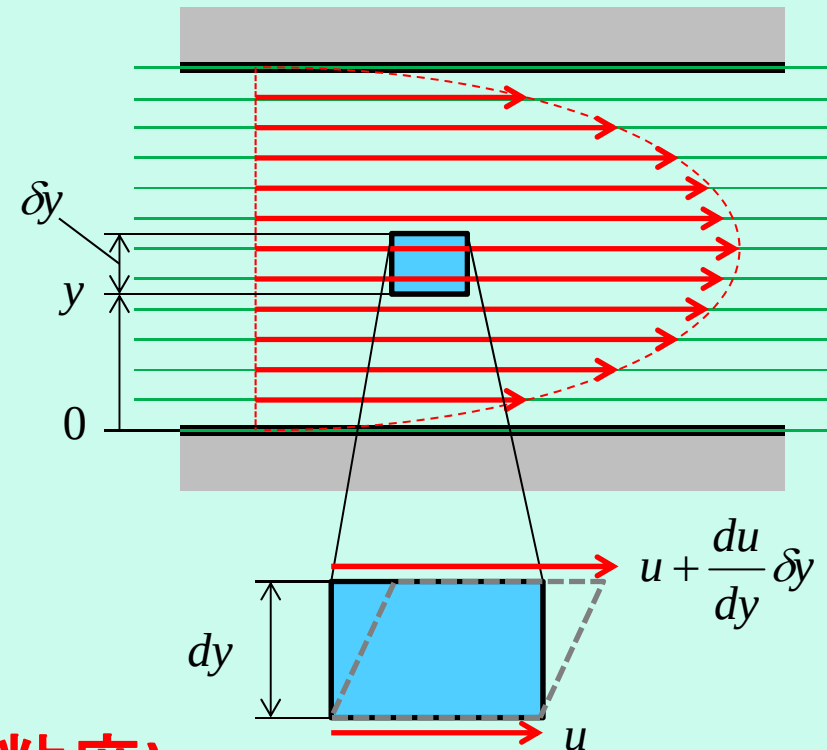
右図のように、下壁面位置を0としたとき、
 y 位置の微小要素に作用する水平方向の
応力(せん断応力)を τ とすると、

$$\tau = \mu \left\{ \left(u + \frac{du}{dy} \delta y \right) - u \right\} / \delta y = \mu \frac{du}{dy}$$

$$\therefore \tau = \mu \frac{du}{dy}$$

ニュートンの粘性の法則

μ : 粘性係数(または粘性率、粘度)



粘性係数

粘性はなぜ発生するのか？

連続体のスケールでみた場合の分子運動と分子間の相互作用(第1回講座参照)

粘性は分子運動に起因するので、この粘性のことを特に「分子粘性」と呼んだりすることもある。

次元解析

τ (応力)	Pa
du/dy (ひずみ速度)	1/s
μ (粘性係数)	Pa·s

固体弾性体の場合

σ (応力)	Pa
ε (ひずみ)	-
E (弾性係数)	Pa

管内摩擦損失ヘッド計算式(実験式)の 歴史的な推移

ベルヌーイの定理

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \Delta h_f$$

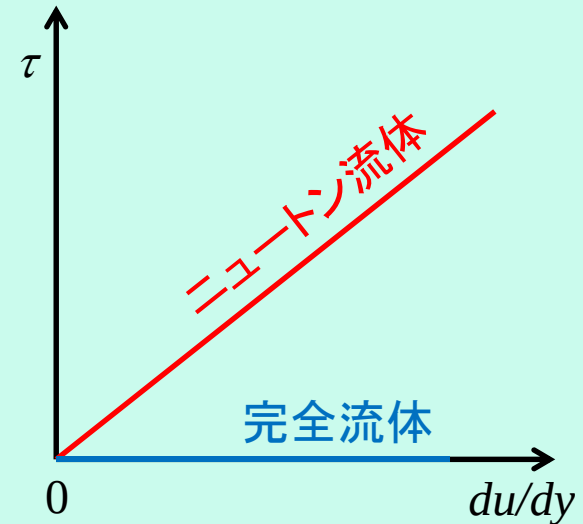
摩擦損失ヘッド

- | | |
|-----------------------------|---|
| (1) ヴォルトマン(Woltman)、1791 | $\Delta h_f = a_1 (l / d) v^{1.75}$ |
| (2) アイテルワイン(Eytelwein)、1796 | $\Delta h_f = a_2 (l / d) v^2$ |
| (3) プロニー(Prony)、1804 | $\Delta h_f = (a_3 v + b_3 v^2) l / d$ |
| (4) ワイスバッハ(Weisbach)、1845 | $\Delta h_f = \left(a_4 + \frac{b_4}{\sqrt{v}} \right) \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}$ |
| (5) ダルシー(Darcy)、1858 | $\Delta h_f = \left(a_5 + \frac{b_5}{d} \right) \frac{l}{d} v^2$ |

$$\Delta h_f \propto v^{1 \sim 2}$$

ニュートン流体

右図のように、ひずみ速度-せん断応力が線形で表せる場合(μ :一定)、このような流体を**ニュートン流体**と呼ぶ。
水や空気はニュートン流体である。



また、ニュートン流体以外の流体(ひずみ速度-せん断応力の関係が線形ではない流体)を**非ニュートン流体**と呼ぶ。
弾性変形のある高分子剤を含んだ流体がこの一種である。

レオロジー: 非ニュートン流体の取り扱う学問分野

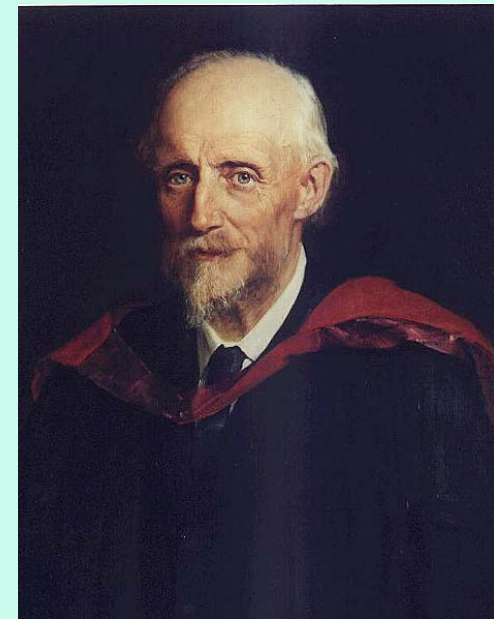
以降、特に断りがない限り、流体とはニュートン流体のことを指すものとする。

レイノルズの実験①

OpenFOAM
勉強会
for beginner

オスボーン・レイノルズ(Osborne Reynolds)、英、1842-1912

- ・ マンチェスター大学(かつてのマンチェスタービクトリア大学)の教授。
- ・ 層流-乱流遷移の研究で有名。
- ・ レイノルズ数の名前の由来。



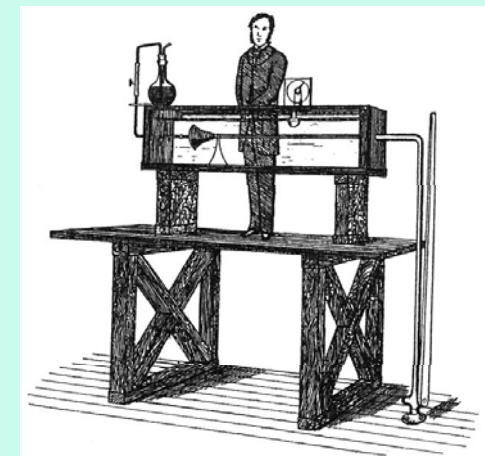
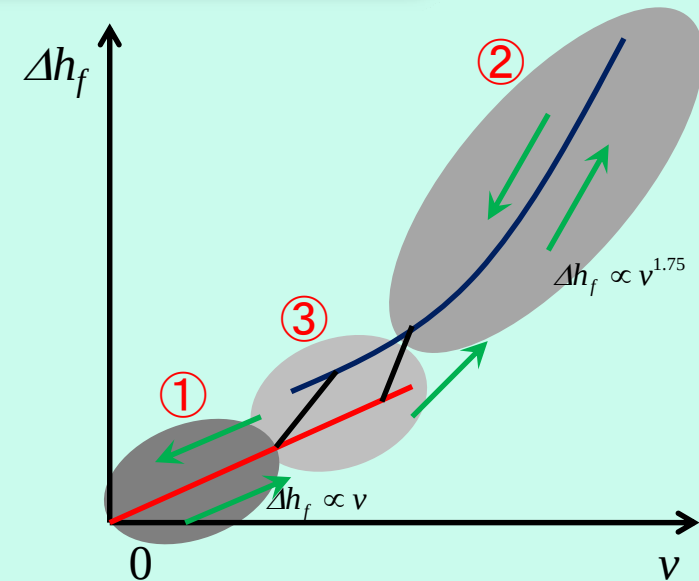
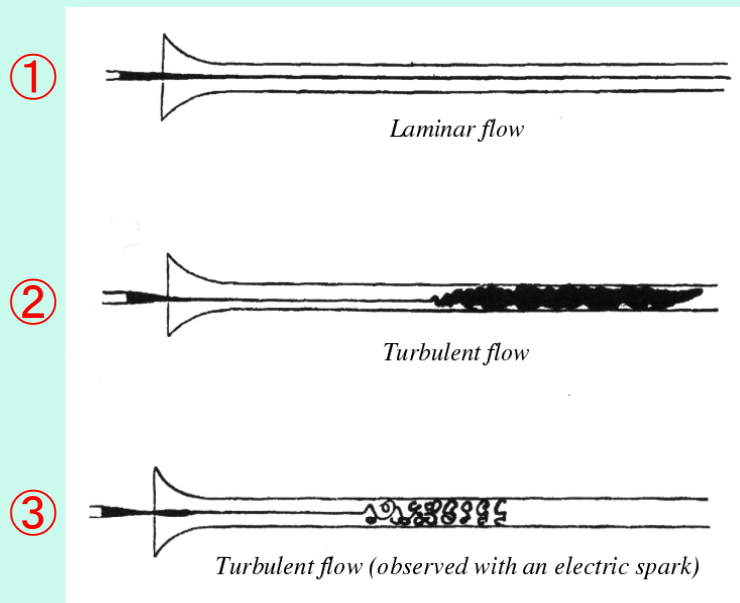
レイノルズの実験②

レイノルズの行ったこと

損失ヘッドと流速の関係を詳細に調べた

流速の低い領域 $\Rightarrow \Delta h_f \propto v$

流速の高い領域 $\Rightarrow \Delta h_f \propto v^{1.75}$



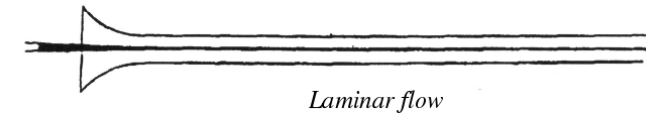
層流、乱流、レイノルズ数①

右図、①の状態 : 層流
右図、②の状態 : 乱流
右図、③の状態 : 遷移領域

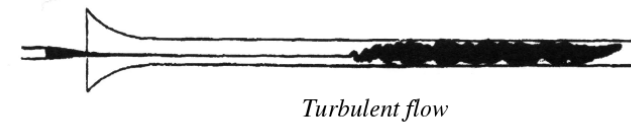
さらに、レイノルズは、上記の
流れの状態が次の無次元数で
定まることを見つけた。

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} = \frac{U D}{\nu}$$

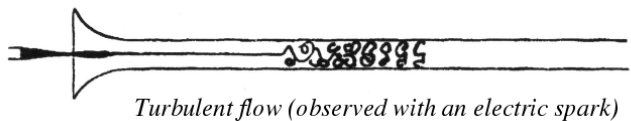
①



②



③



U : 代表速度

D : 代表長さ

ν : 動粘性係数($=\mu/\rho$)

この無次元数をレイノルズ数と呼ぶ。

層流、乱流、レイノルズ数②

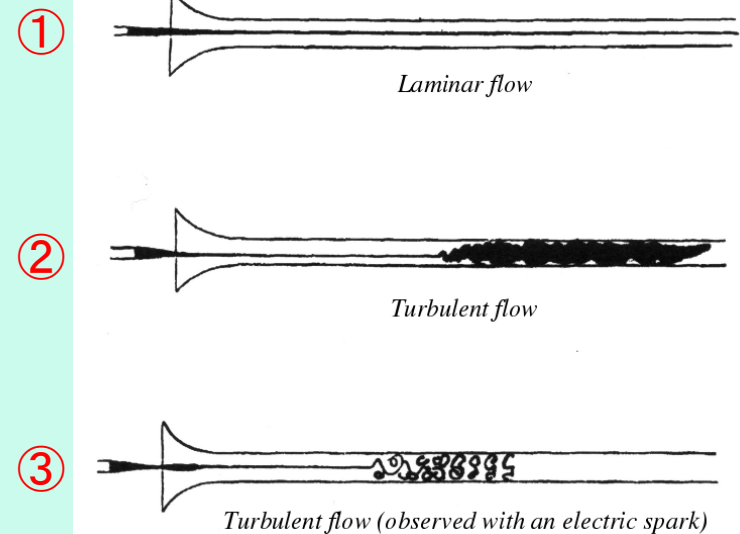
①層流 $Re \leq 2000$

②乱流 $Re > 4000$

③遷移領域
 $2000 < Re \leq 4000$

U : 代表速度=管内の平均流速

D : 代表長さ=管径



注意！) 上記数値は絶対的なものではない。

実際のところ、層流-乱流遷移現象は、
上流の流れの状態や管壁の状態により大きく変化する。

損失ヘッドパラメータへの レイノルズ数適用①

レイノルズ以降の管内摩擦損失ヘッドの研究

損失ヘッドの計算式として、ダルシー・ワイズバッハの式が
使用されるようになった。

Darcy・Weisbach

ダルシー・ワイズバッハの式

$$\Delta h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}$$

λ : 管摩擦係数(無次元)

l : 管長、 d : 管径

v : 管内平均流速

管摩擦係数のパラメータとしてレイノルズ数が使用される
ようになった。

層流での損失ヘッド(ハーゲン・ポワズイユの法則)

$$\Delta h_f = \frac{64}{Re} \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad \left(\lambda = \frac{64}{Re} \right) \quad \text{Hagen・Poiseuille}$$

損失ヘッドパラメータへの レイノルズ数適用②

乱流での損失ヘッド(損失係数)

- ① ブラジウスの式 ($Re=3 \times 10^3 \sim 10^5$)
Blasius

$$\lambda = 0.3164 Re^{-0.25}$$

- ② プラントル・カルマンの式 ($Re=3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^6$)
Prandtl・Karman

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.0 \log_{10} (Re \sqrt{\lambda}) - 0.8$$

- ③ ニクラゼの式 ($Re=10^3 \sim 3 \times 10^6$)
Nikuradse

$$\lambda = 0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.237}}$$

まとめ

OpenFOAM
勉強会
for beginner

本講座では、以下のことについて説明しました。

- 流体には粘性が存在し、これがエネルギーの損失となる。
- 水や空気は(非圧縮性流体では)粘性係数が一定であり、ニュートン流体である
- 層流、乱流、レイノルズ数を紹介しました。
- 損失ヘッドを少し紹介しました。

次回の予告

次回の流体力学の基礎では、
「流体摩擦および境界層2」と題して講習会を行います。

次回もOpenFOAM勉強会for beginnerの中
で行いたいと思います。

本日は、講習会「流体力学の基礎」に
お付き合い頂きありがとうございました。