

機械情報工学科 流体力学

第 1 回

流体の物理的性質



亀谷 幸憲

流体デザイン研究室

kametaniy@meiji.ac.jp

はじめに

評価方法

毎回レポート課題30%，期末試験を70％で評価する。
総合して，本講義内容の60％以上の理解を合格基準とする。

講義資料

- ・板書とスライドを使用。
- ・PPTスライドをOh-o!Meijiを通じて配布。
- ・配布できないメディア資料も一部あり。
- ・教科書の指定は行わない。

授業外で質問があれば

- ・ 居室：第二校舎 5 号館5101(5102)
- ・ oh-o!Meiji
- ・ email: kametaniy@meiji.ac.jp
 - ・ meiji.ac.jpのアカウントから送ること。タイトルは「流体力学の質問」。

定期試験の受験資格

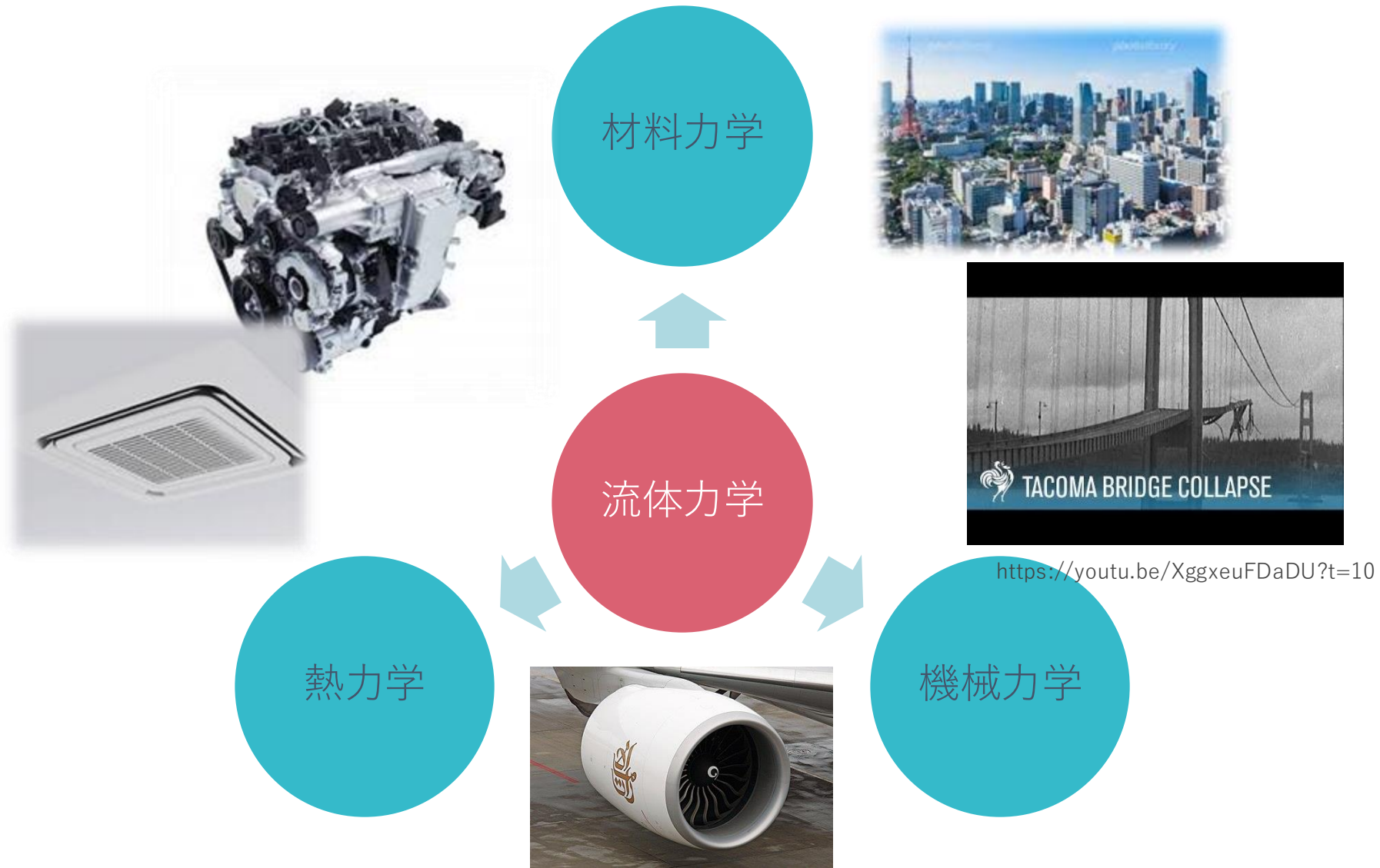
VI

定期試験

定期試験は原則として，春学期，秋学期に各1回，各々2週間程度の日程で行われる。各科目について全授業日数の2 / 3以上出席しないと定期試験を受験する資格をもたない。

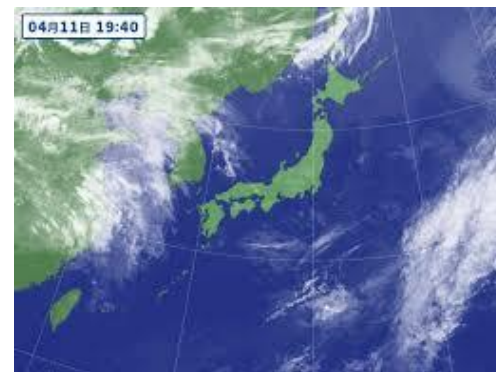
理工学部便覧より抜粋

四大力学の中の流体力学





身の回りの流体



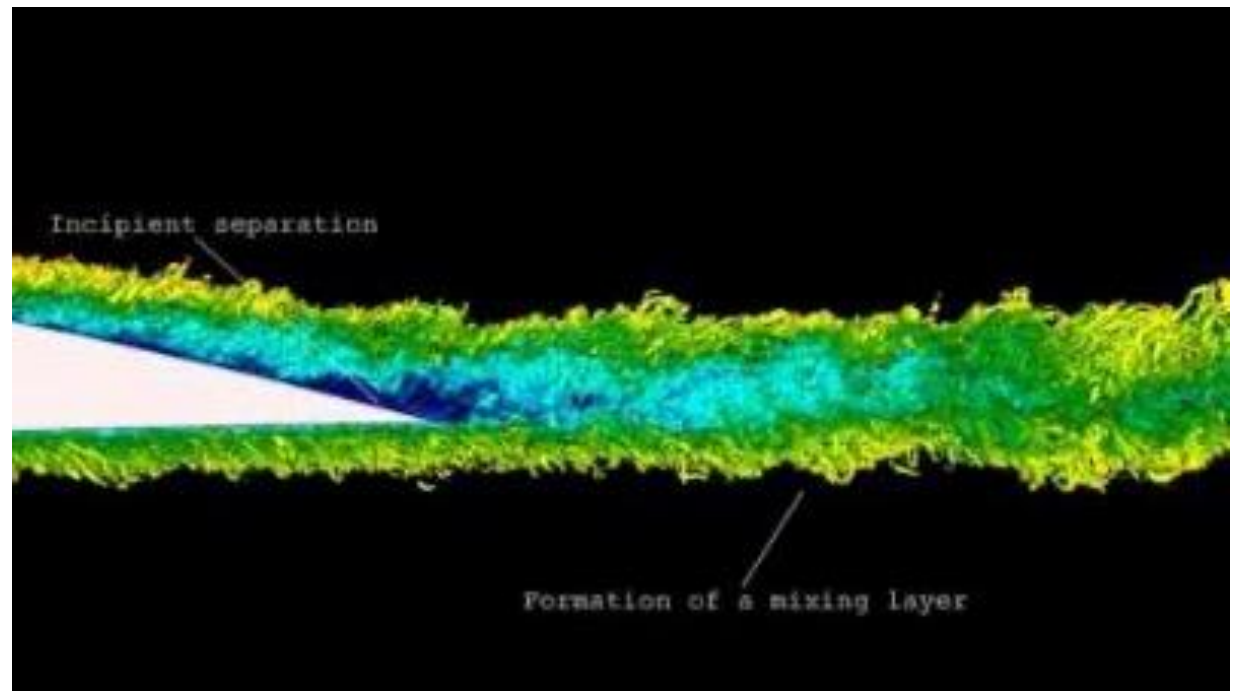
幅広いサイズ・速度・種類の流体が関与

流体と情報分野

- 流体力学の理論の確立
- 数値解析手法の確立
- コンピュータの発達



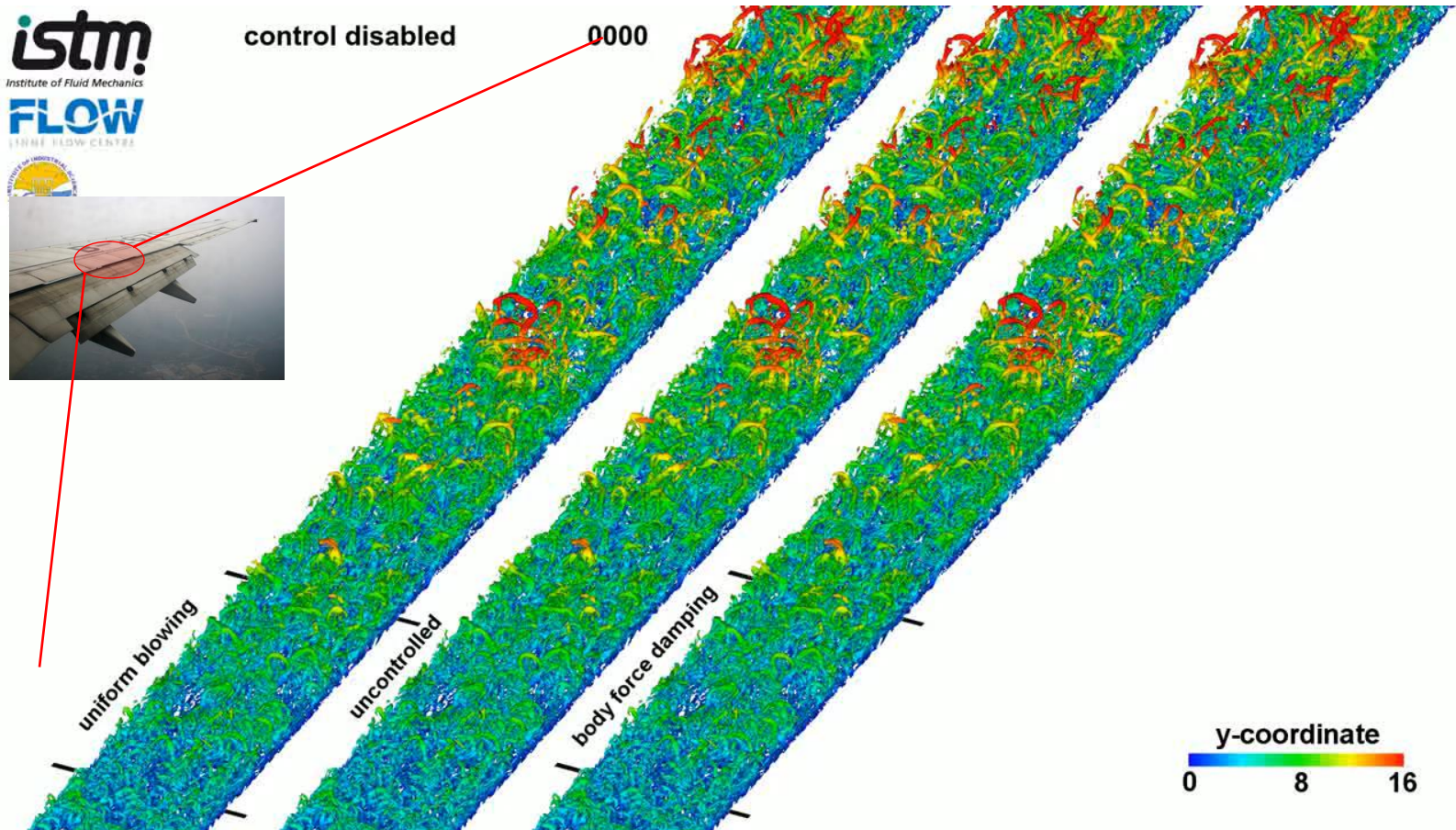
コンピュータによる流体現象を高精度に予測できるようになった。



<https://youtu.be/aR-hehP1pTk>

What's next?

流体と情報分野



以前として詳細の解析、制御は困難

流体と情報分野

現象解明
モデル化

機械学習



IoT



制御
データ利用



この講義の目標 [シラバス抜粋]

水、空気、油を代表とする流体は身近な物質で、古代から人類が様々に利用してきた。現在も機械、電子工業においてその機能を活用することが多い。流体すなわち、液体及び気体の基本的な性質や挙動を解説する。またこの運動を支配している基礎式を明らかにし、身近な話題を用いて流体に対する理解を深める。

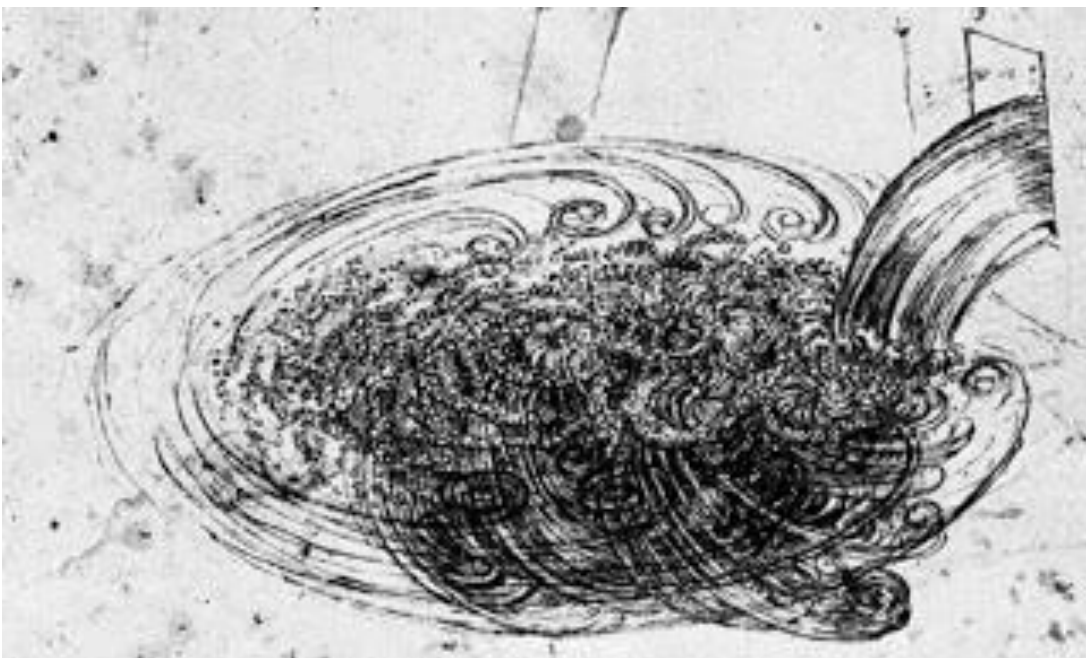
【達成目標】非圧縮性流体の性質や動きを学び、流体現象を支配する原理を知る。これらの現象を一般式で表せることを知り、動的挙動は微分方程式で表現させることを学ぶ。これらの式の扱い方を身に付け、さまざまな流れ現象に対する解析能力を習得する。

非圧縮ナビエ・ストークス方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i$$

スケジュール

- [第1回] 流体の物理的性質
- [第2回] 流体の静力学（1）圧力と水頭の関係
- [第3回] 流体の静力学（2）浮力について
- [第4回] 流体の運動（1）流線・流跡・流管の定義や運動の記述法
- [第5回] 流体の運動（2）連続の式と運動方程式
- [第6回] 基礎的な流れ場での速度分布解析
- [第7回] エネルギー保存則とベルヌイ式
- [第8回] オリフィスとベンチュリー流路を利用した流速測定原理
- [第9回] 流体の運動量（1）流体の運動量変化と力の関係
- [第10回] 流体の運動量（2）さまざまな流れにおける流体の運動量変化と力の関係
- [第11回] 物体周りの流れ（1）境界層について
- [第12回] 物体周りの流れ（2）流体抵抗
- [第13回] 層流と乱流
- [第14回] 相似則



Leonardo da Vinci スケッチより



流体について

古池や 蛙飛び込む 水の音

松尾芭蕉

ゆく河の流れは絶えずして、しかももとの水にあらず

鴨長明「方丈記」 抜粋

水はどんな形にもなれる。枡に入れば四角く、瓶に入れば丸く
時には岩すら砕いてどこまでも流れていく

鱗滝 左近次，吾峠呼世晴「鬼滅の刃」より

流体とは

“A substances that **deforms continuously** when acted on **by a shearing stress of any size**”

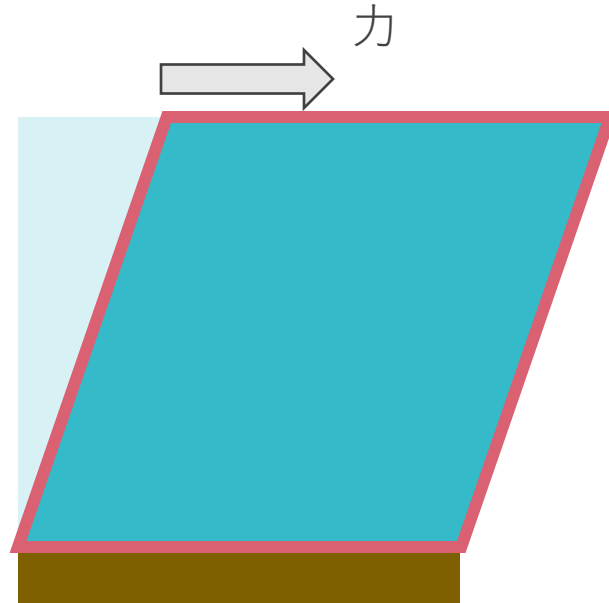
接線方向の力がかかると変形し続ける

固体

変形に耐えようとする

流体

どこまでも変形し続ける



流体運動は以下を必ず満たす

質量保存

系内の流体の総質量は変化しない

運動量保存（ニュートン第二法則）

系内の運動量の総和は外力が加わらない限り変化しない

エネルギー保存（熱力学第1法則）

系内の内部エネルギーの変化は入ってきた熱と外界から系大して行われた仕事の和に等しい。

単位系の確認：SI単位形

基本単位から抜粋

物理量	名称	記号
質量	キログラム	kg
長さ	メートル	m
時間	秒	s

組立単位から抜粋

物理量	名称	記号	定義
力	ニュートン	N	$\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
圧力, 応力	パスカル	Pa	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}(= \text{N}\cdot\text{m}^{-2})$
エネルギー, 仕事	ジュール	J	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}(= \text{N}\cdot\text{m})$
仕事率	ワット	W	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}(= \text{J}\cdot\text{s}^{-1})$
振動数	ヘルツ	Hz	s^{-1}

重要な性質(1) 質量と力

密度 (Density): ρ [kg/m³], □ —
質量/体積

比重量 (Specific weight): $\gamma = \rho g$ [N/m³], g は重力加速度
重量/体積, 力/体積

参考：水を基準にして表す表記

比重 (Specific gravity): $SG \equiv \frac{\gamma}{\gamma_{water}} = \frac{\rho}{\rho_{water}}$

標準状態 (25°C, 101kPa) では

水： $\approx 10^3$ kg/m³

空気： ≈ 1.2 kg/m³

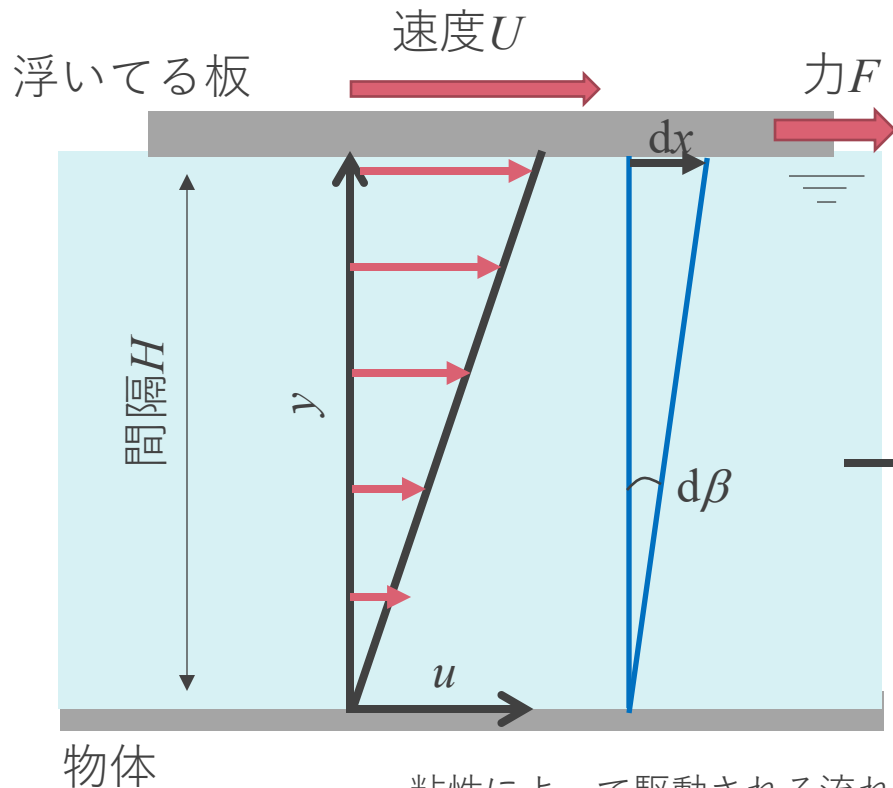
一般に密度 ρ は温度 T と圧力 p の関数である, すなわち $\rho = \rho(p, T)$.

例) 理想気体の場合 $\rho = \rho(p, T) = \frac{p}{RT}$, R は気体定数

重要な性質(2) 粘性

粘度・粘性係数(viscosity): μ [Pa.s], ミュー

動粘度・動粘性係数(kinematic viscosity): ν [m²/s], ニュー



粘性による滑り無し条件

物体表面で流体と物体の相対速度は一致

微小時間 dt の間の微小変位 dx

$$dx = U dt$$

$$\Rightarrow \tan d\beta = \frac{dx}{H} \sim d\beta$$

β の時間変化率は

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{1}{H} \frac{dx}{dt} = \frac{U}{H} \Rightarrow \frac{du}{dy} \quad \text{剪断ひずみ速度} \quad [1/s]$$

流体部面積 A での単位面積辺りのせん断応力 τ

$$\tau \equiv \frac{F}{A}$$

剪断ひずみ速度と剪断応力の関係は？

重要な性質(2) 粘性

粘度・粘性係数(viscosity): μ [Pa.s], ミュー

動粘度・動粘性係数 (kinematic viscosity): ν [m²/s], ニュー

剪断ひずみ速度と剪断応力の関係は？

もし線形関係にあり, $\tau \propto \frac{du}{dy}$ ならその流体はニュートン流体である。

また, その比例定数は粘性係数 μ であり以下で示される。
前ページの例では, $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ となるが, 一般に3次元場では剪断応力はテンソルとなる。

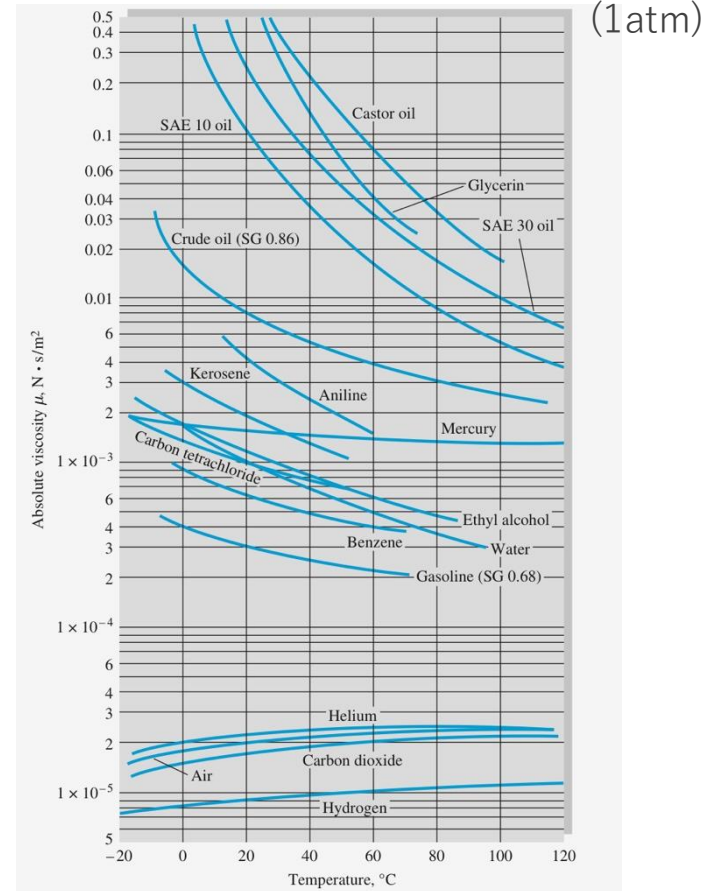
$$\tau_{ij} = \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

粘性係数を密度で除した量を動粘性係数 ν といい, 流体の運動を記述する上で重要となる。

表 標準状態での例

	空気	水	オイル
粘性係数 μ [Pa.s]	1.8×10^{-5}	1.1×10^{-3}	0.38

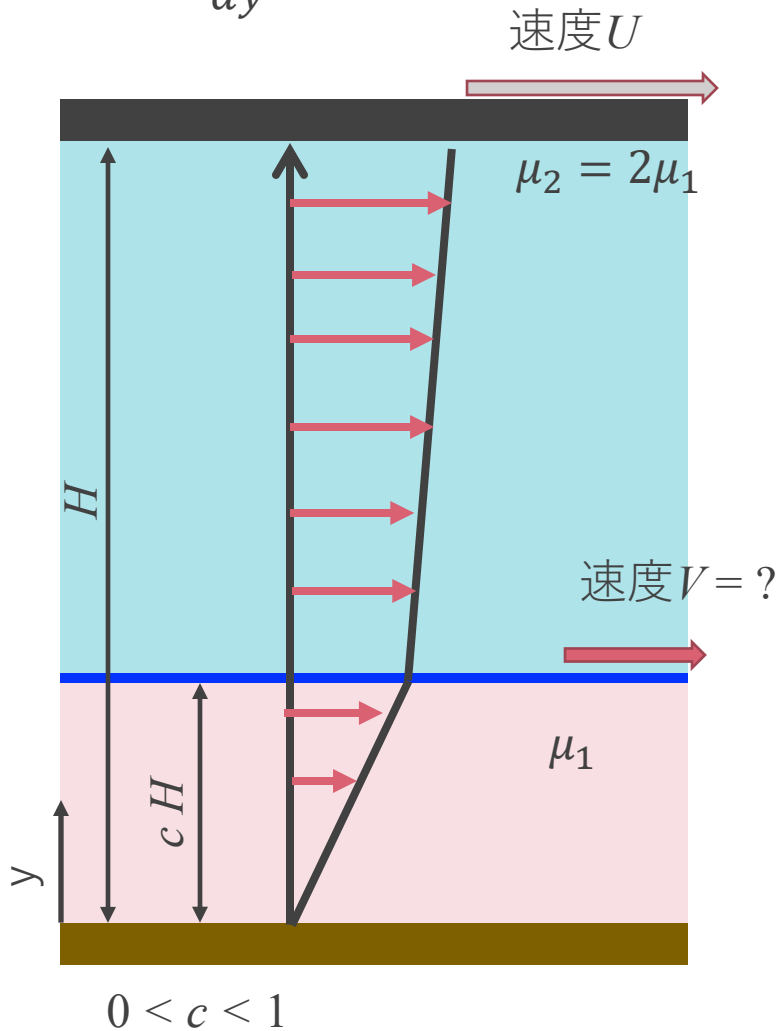
Note: 粘性係数は温度によって変化する



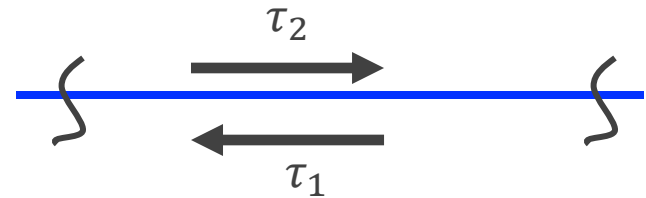
Fluid Mechanics 8th ed., White FM, McGrawHillより

練習問題: V を求めよ

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



ヒント：中間板上の力のバランスを考える



$$\Sigma F_H = \tau_2 A - \tau_1 A = 0$$

$$\begin{cases} \tau_1 = \mu_1 \frac{V}{cH} \\ \tau_2 = \mu_2 \frac{U - V}{H - cH} \end{cases}$$

V について解くと

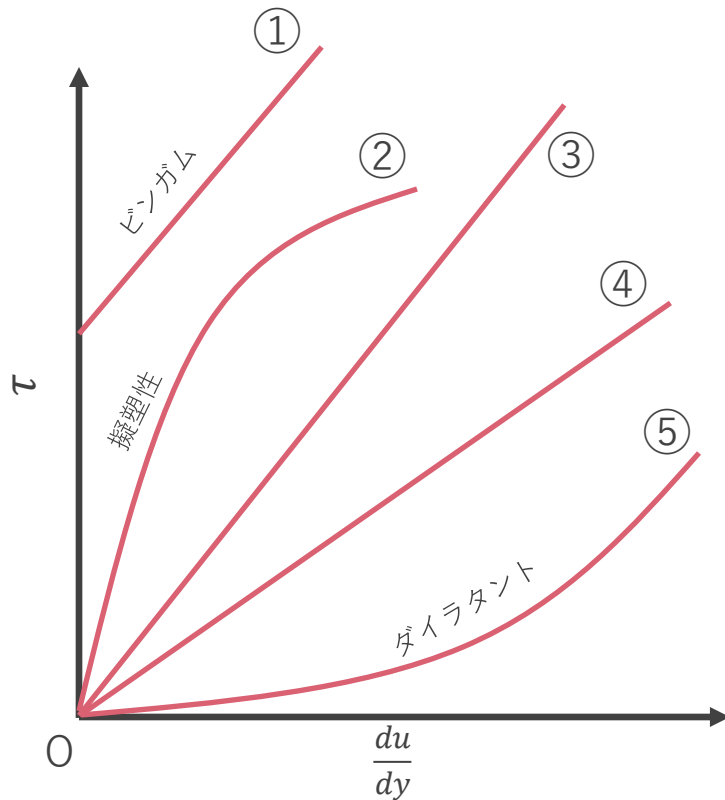
$$V = \frac{2c}{1 + c} U$$

重要な性質(2) 粘性

粘度・粘性係数(viscosity): μ [Pa.s], ミュー

動粘度・動粘性係数 (kinematic viscosity): ν [m²/s], ニュー

ニュートン流体でないもの
=> 非ニュートン流体

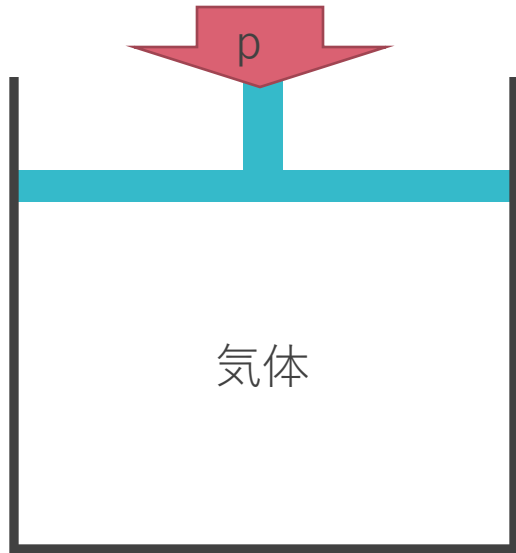


<https://youtu.be/RIUEZ3AhrVE?t=23>

本授業では，ニュートン流体のみを扱う。

重要な性質(3) 圧縮性

圧力が上がった際に体積がどう変化するか。
気体で重要な要素。



圧力 $p \Rightarrow p + dp$

体積 $V \Rightarrow V + dV$

$$dp = -K \frac{dV}{V}$$

体積弾性係数 [Pa]

圧縮性流体と非圧縮性流体

気体の圧縮性が無視できるか否か。

音速 a に対する速度 U の比であるマッハ数が影響

$$M = \frac{U}{a}$$

ここで,

$$a = \sqrt{K/\rho}$$

$M > 1$: 超音速 (衝撃波が生じる)

$M < 1$: 亜音速

$M < 0.3$: 非圧縮

$M > 0.3$: 圧縮性が無視できない
とされている。

重要な性質(3) 圧縮性

Mach Number

$M \approx 0.8$

$M \approx 0.3$

$M \approx 8$



スペースプレーン
JAXA



リニア新幹線



リニア新幹線

$M \approx 0.08$



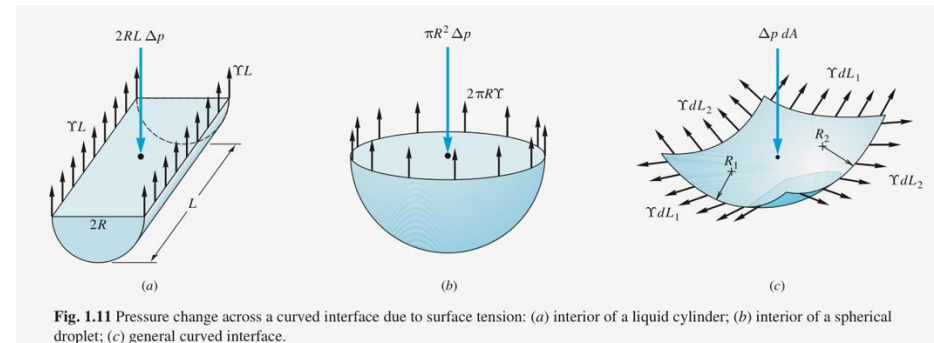
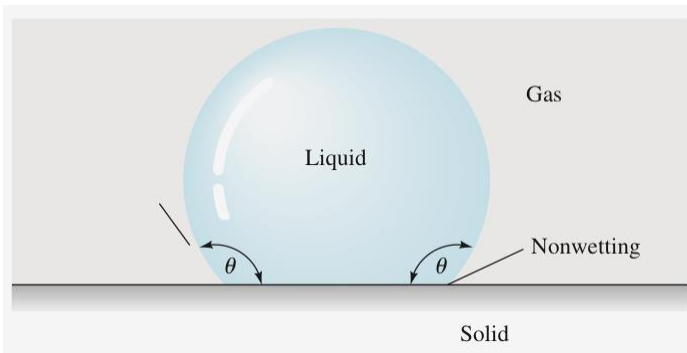
自動車

重要な性質(4) 表面張力

流体の界面に働く張力
=> 表面張力 [N/m]

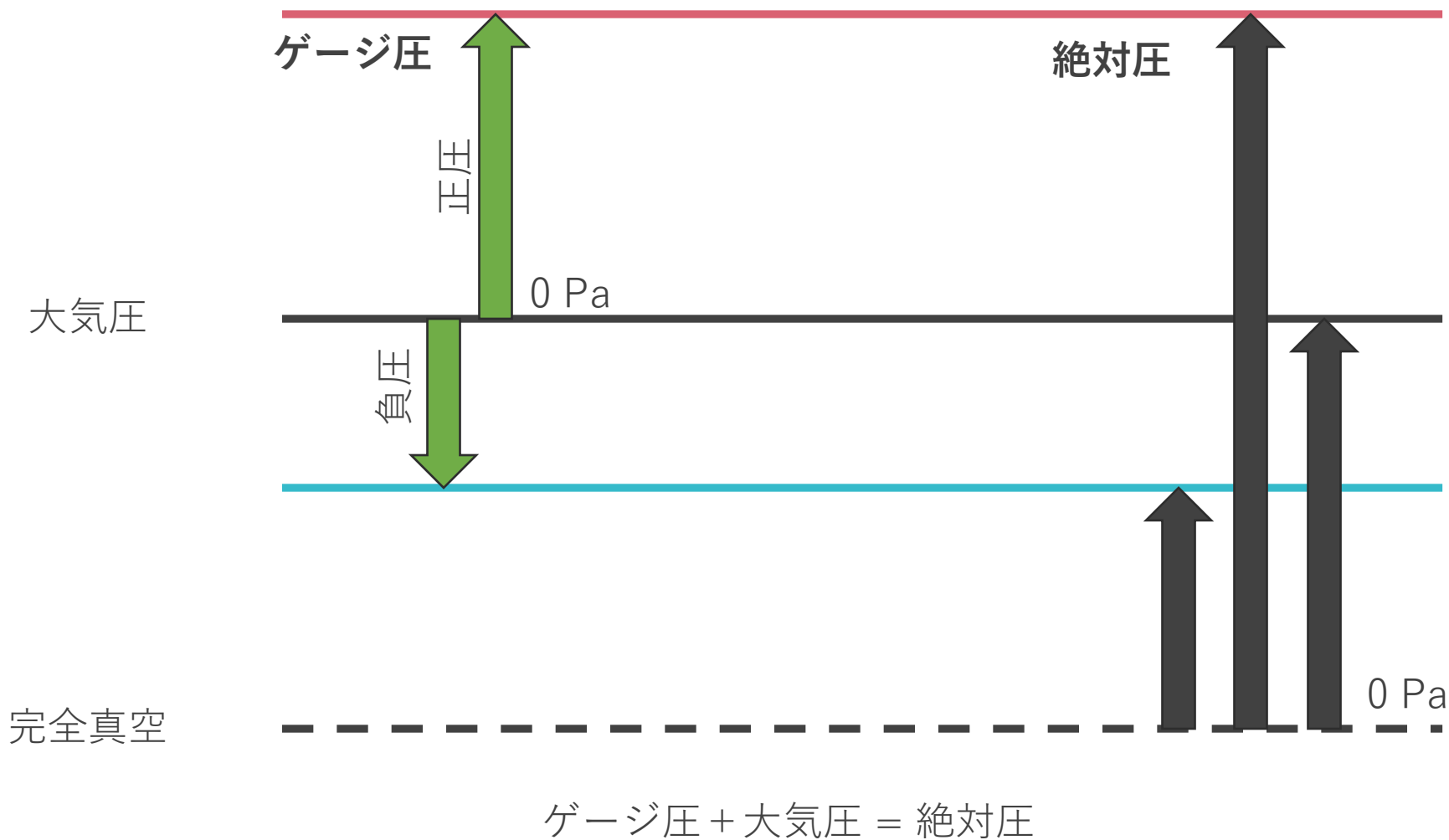


https://youtu.be/H_qPWZbxFI8



Fluid Mechanics 8th ed., F. M. White

重要な性質(5) ゲージ圧力と絶対圧力



重要な性質(5) ゲージ圧力と絶対圧力

キャビテーション

局所の圧力が周囲圧力より低くなると負圧により、水が気化しバブルにより大きなダメージが生じる。



<https://youtu.be/N3WwQKZ05Uk?t=60>



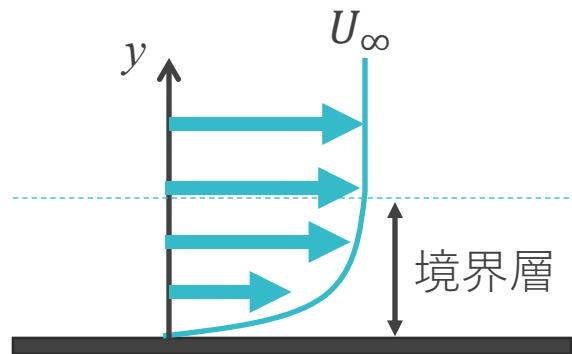
<https://www.britannica.com/science/cavitation>

流体の分類と本講義でのターゲット

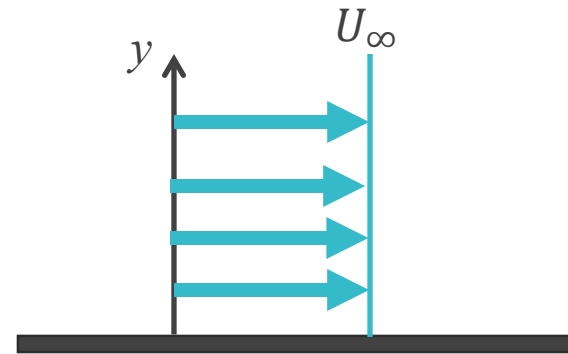
1) ニュートン流体か非ニュートン流体か => **ニュートン流体**

2) 非圧縮性流体か圧縮性流体か => **非圧縮性**

3) 粘性流体か理想流体か => **基本的に粘性流体として扱う**
理想流体：粘性の効果を無視する



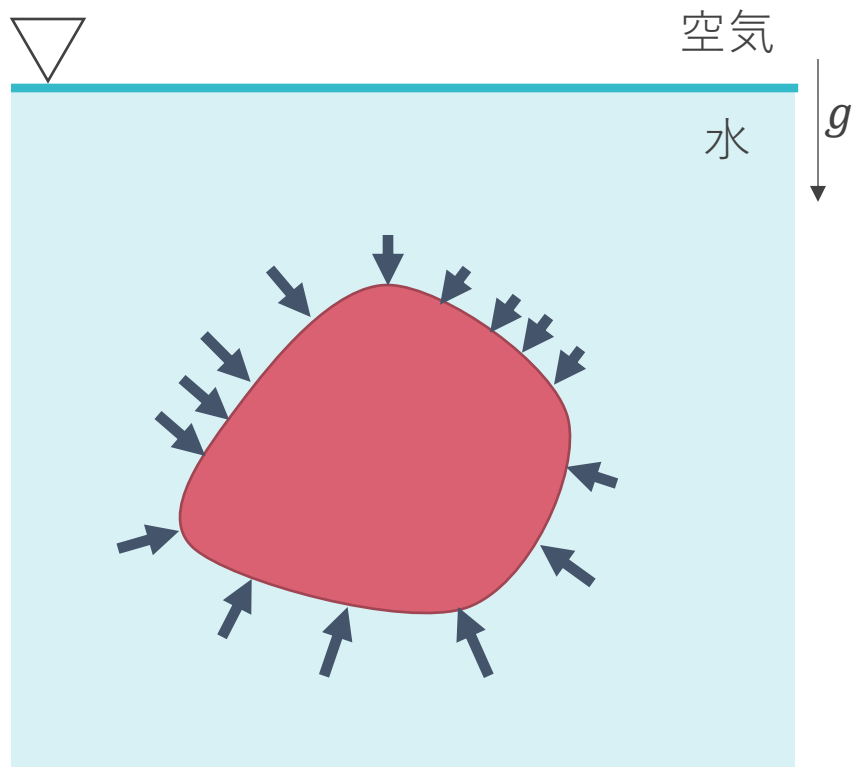
粘性流体



理想流体

予告：静水力学

静止状態にある物体が流体から受ける力の
バランスを考える。



レポートについて注意！

- PDFでOh-o!Meiji上のレポートボックスに提出すること
(手書きスキャン・ワード系ソフト問わない)
- 期限厳守。基本的に翌週の月曜日15:20まで。
- 冒頭に学年・組・番号・名前を必ず書くこと。
- 導出過程をきちんと示したレポートとして体裁を整えること。