専門科目(TG010001)

流体力学II
Fluid Mechanics II

劉　　　浩
太田匡則

[授業の方法]

講義、前期火３限、工１７−２１４

[受入人数] ～８０名

[受講対象]

工学部他学科生履修可, 他学部生　履修可, 科目等履修生履修可;

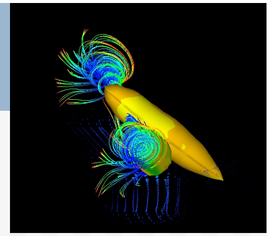
機械工学科3年生、先進科学プログラム課程および他学科学生で受講が認められた者。

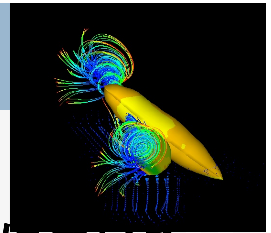
[授業概要]

流体現象の記述と基礎方程式、理想流体の速度ポテンシャルと流れ関数、粘性流体の層流と乱流の諸特性、ナビエ・ストークス方程式の解析例、境界層解析の基礎など、流体力学の基礎的事項を体系的に学習する。

[教科書・参考書] 流体の力学ー現象とモデル化ー

流体力学（西川、平岡：工科の物理）





[目的・目標]

自然科学の基礎となる、流体現象の数学的記述や解析および工学的側面について理解する。具体的には典型的な基礎方程式に関して幾つかの簡単な解析解を例に取り、物理的な現象の把握を目的としながら、速度ポテンシャルや流れ関数、渦や循環、境界層や摩擦力、層流や乱流、揚力や抗力などの流体力学の基礎的な事項を学習する。

科目の達成目標　　関連する授業週　　達成度評価方法　　科目の成績評価全体に対する重み

1. ナビエ・ストークス方程式の解析例を通して、流体現象の数学的記述と基礎方程式の解析や物理現象を理解する。

(B-3) 1, 2, 3, 4　中間試験, 期末試験　20, 10 %

2. 物体まわりの境界層や摩擦力、境界層理論の基礎について理解する。

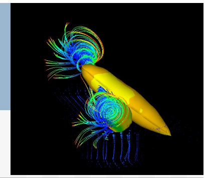
(B-3) 5, 6, 7　中間試験, 期末試験　20, 10 %

3. 理想流体において：渦度：rotＶ＝０(速度ベクトルＶ)すなわち渦度なしの流れ＝ポテンシャル流れをあつかい, 基本的な流れが簡単な関数であらわせること、またそれらの重ね合わせが円柱周りの流れを表せることも理解できるようになる。

(B-3) 8, 9, 10, 11　期末試験　20 %

4. 物体まわりの循環（速度の全周積分）を導入し, 円柱ー平板間の写像関係により循環から平板の揚力が決定でき、楕円翼などの揚力特性を表せることが理解できるようになる。

(B-3) 12, 13, 14　期末試験　20 %



［授業計画・授業内容］

１． 流体現象の数学的記述と基礎方程式の解析について概説する。ニュートン流体、ナビエ・ストークス方程式、レイノルズ数などを理解する。

２.ナビエ・ストークス方程式の、平行平板間の流れやクェットの流れへの適用と解析を通して、物理的現象を理解する。

３.円管内の流れ（ポアズイユの流れ）、レイリ−の流れ、振動平板間の流れについても、ナビエ・ストークス方程式の解析や演習を通して理解する。

４.物体近傍にできる境界層の現象、境界層理論の基礎方程式について理解する。

５.境界層の解析の幾つかの方法、平板境界層や円柱と球まわりの境界層の形成と特質を理解する。

６.円柱まわりの流れの剥離やカルマン渦列と円柱に働く力の関係、揚力や抗力の意義などを演習を通して理解する。

７.中間試験（6月7日）

8. 理想流体での渦度：rotＶ＝０(速度ベクトルＶ)の ポテンシャル流れの導入について理解する

9. 複素ポテンシアル、速度ポテンシアル、複素速度を応用し基本的な流れたとえば一様流、斜めの一様流れを簡単な関数で表すことについて理解する

10. わきだし、吸い込み、渦糸れについて理解する

11. 円柱周り、かどを回る流れ、回転円柱について理解する

12. 循環（速度の全周積分）の導入について理解する

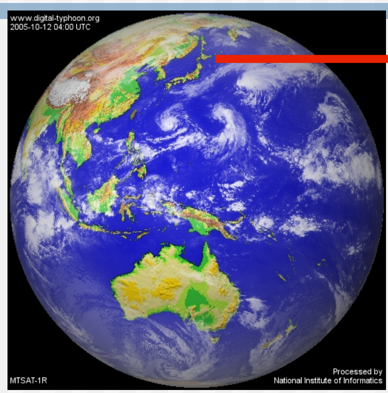
13. ブラジウスの定理、円柱ー平板間の写像関係、クッタの条件について理解する

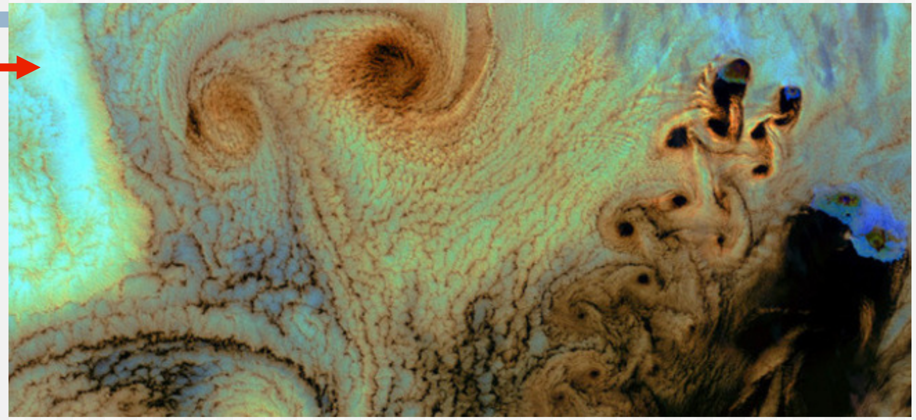
14. 平板の揚力、回転円柱の揚力、ビオサヴァールの法則と楕円翼の揚力特性 、抗力係数について理解する。

15. 期末試験(8月2日)

1.流体現象
(Phenomena of Fluid)

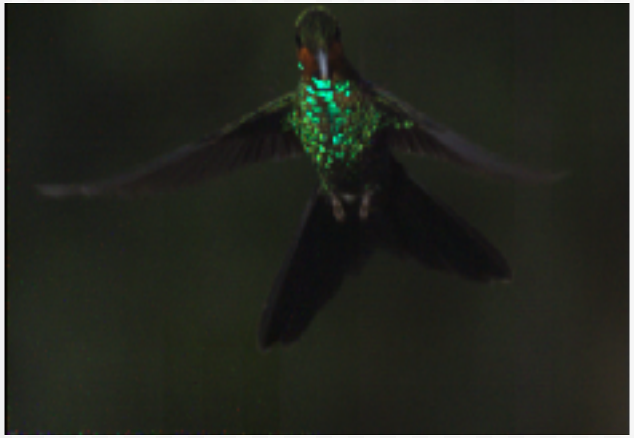
自然



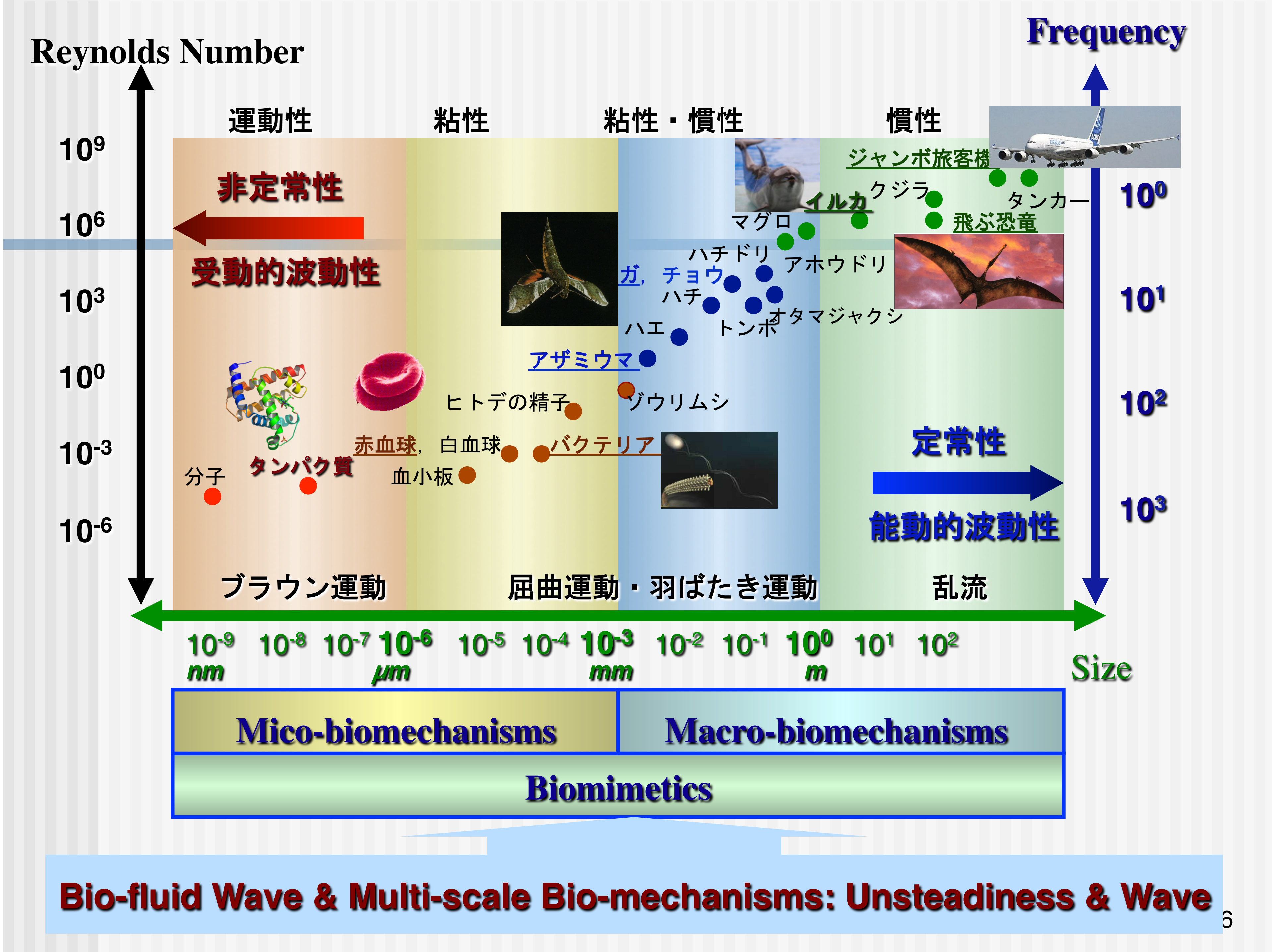


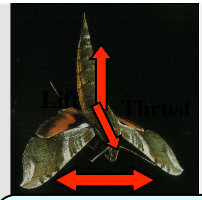
工学

生物



生体


Reynolds Number
Frequency
運動性
粘性
粘性・慣性
慣性
10⁹
10⁶
10³
10⁰
10⁻³
10⁻⁶
非定常性
受動的波動性
ジャンボ旅客機
クジラ
タンカー
イルカ
マグロ
飛ぶ恐竜
ハチドリ
アホウドリ
ガ，チョウ
ハチ
オタマジャクシ
ハエ
トンボ
アザミウマ
ゾウリムシ
ヒトデの精子
赤血球，白血球
バクテリア
血小板
分子
タンパク質
定常性
能動的波動性
ブラウン運動
屈曲運動・羽ばたき運動
乱流
10⁰
10¹
10²
10³
10⁻⁹ nm
10⁻⁸
10⁻⁷
10⁻⁶ μm
10⁻⁵
10⁻⁴
10⁻³ mm
10⁻²
10⁻¹
10⁰ m
10¹
10²
Size
Mico-biomechanisms
Macro-biomechanisms
Biomimetics
Bio-fluid Wave & Multi-scale Bio-mechanisms: Unsteadiness & Wave



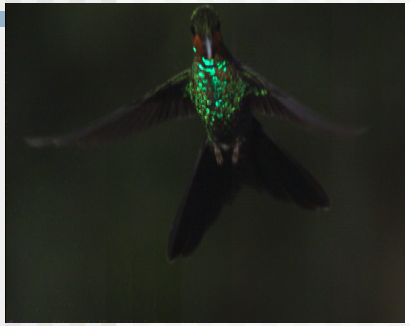
バイオメカニクス

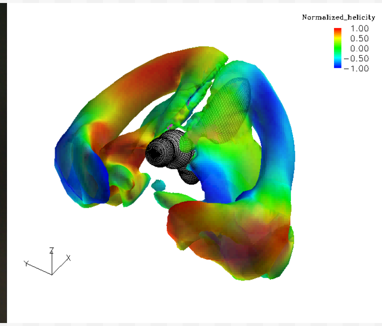
Biomechanics

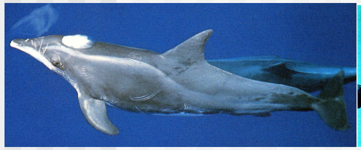
Biology + Mechanics

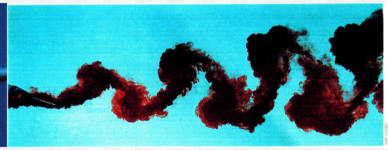
生物＋力学

生物流体力学
Biological fluid dynamics(BFD)



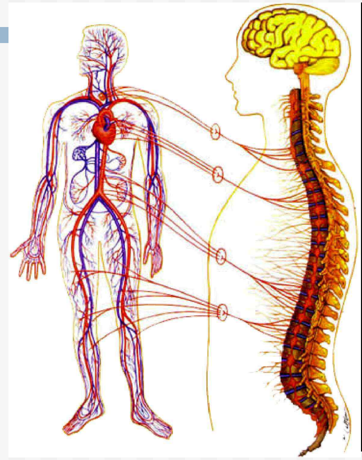


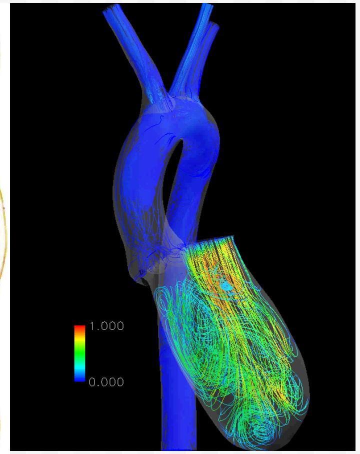




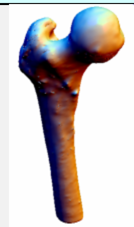
生物機械力学
Biological mechanical dynamics(BMD)

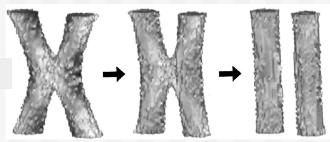
生理流体力学
Physiological fluid dynamics(PFD)

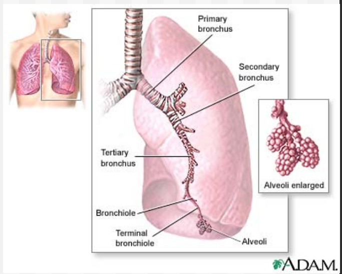




骨生体力学
Bone biomechanics (BBM)



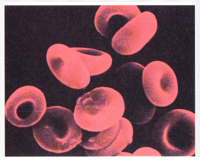




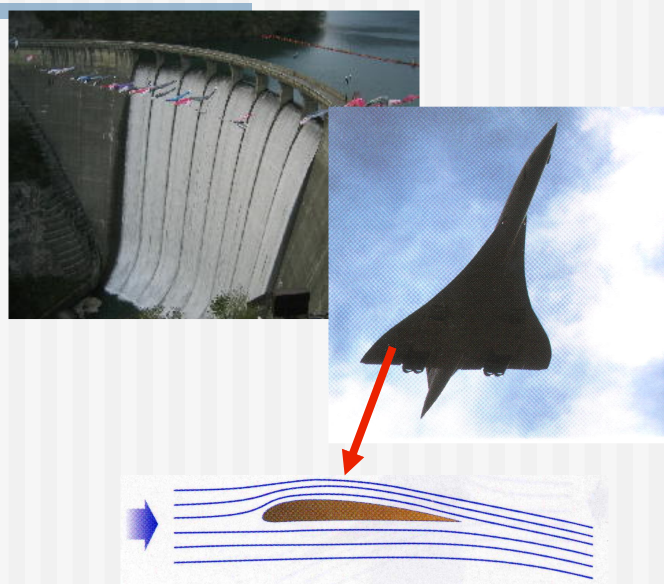
ical

生体熱力学
Bio-thermodynamics(BTD)

細胞生体力学
Cell biomechanics (CBM)



2.流体と流体の力学
(Fluid and Mechanics of Flow)



流体(fluid)：液体(liquid)と気体(gas)
流れ(flow)：流体の運動

流体力学の分類：

水力学(Hydraulics)：簡単な物理法則や数学的方法により流れの巨視的挙動を解析

流体力学(Fluid Dynamics)：厳密な物理法則や数学的記述方法により流体の巨視的・微視的挙動を解析

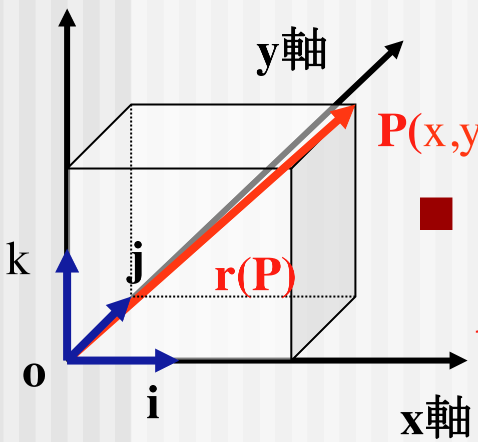
質点運動の３大法則
(The Three Laws of Motion)

- ニュートン力学の運動３法則

  慣性の法則: $F=0, V=\mathrm{const}$

  運動の法則: $F=d(mV)/dt=ma$

  作用反作用の法則: $F_{12}=-F_{21}$



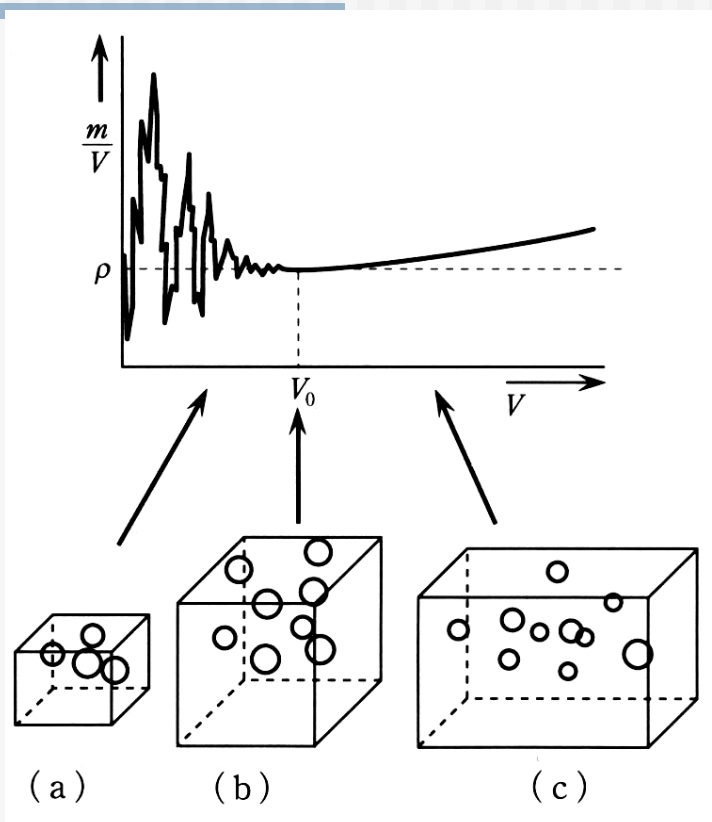
- 慣性座標系における運動方程式：

$$F=dp/dt=d(mV)/dt=m\mathbf{a}=md\mathbf{V}/dt=md^2\mathbf{r}/dt^2$$

3.連続体近似
(Continuum Approximation)

- 流体の分子レベルの微視的な内部構造を無視し、空間に切れ目なく広がる仮想的な物質を考える。
- 連続体近似：流体粒子密度

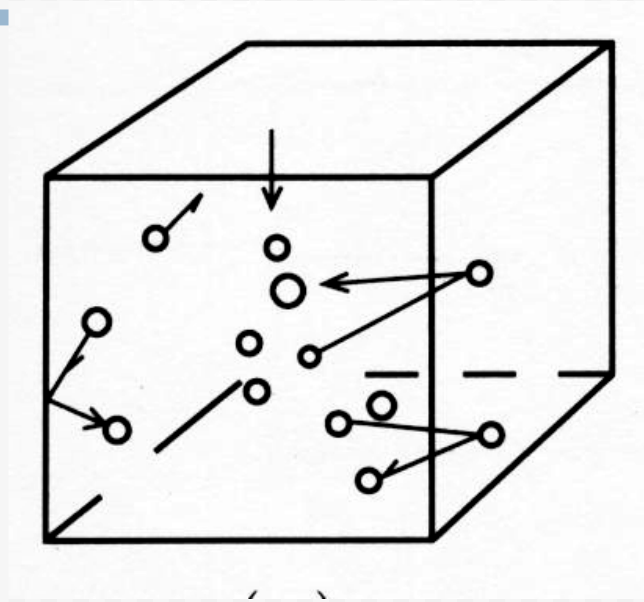
$$\rho = \lim_{V \to V_0} \frac{m}{V}$$



- 連続体力学(Continuum Mechanics)

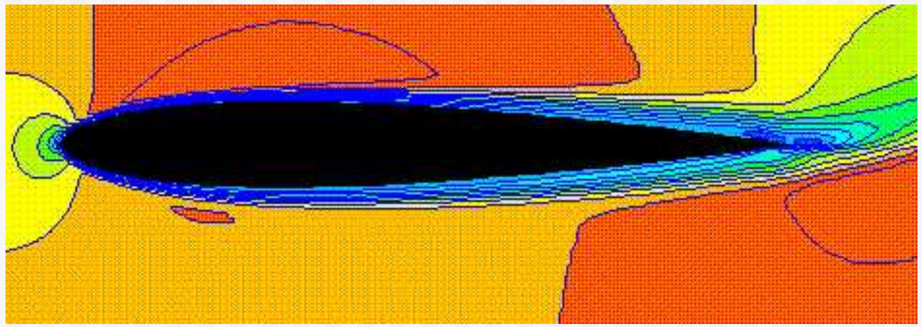
4.圧力 (Pressure)

- 静止流体において分子の熱運動により
  ”たたく”力、いわゆる圧力（分子運動論的に）
生まれる（理想気体の状態方程式）



$$p = \frac{NkT}{V} = \rho RT$$

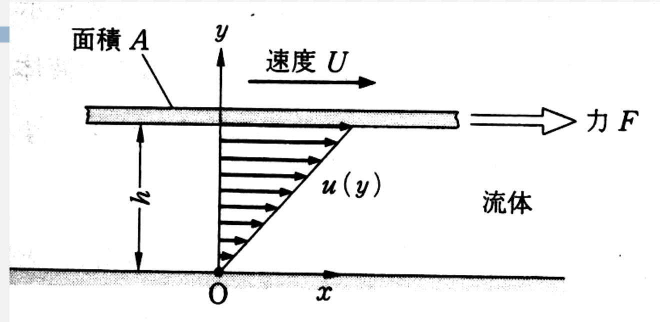
- 運動流体において速度の変化により
  動的圧力も生ずる



$$p \propto \frac{1}{2}\rho V^2$$

- 圧力の等方性

5.粘性と粘性応力 (Viscosity and Viscous Stress)

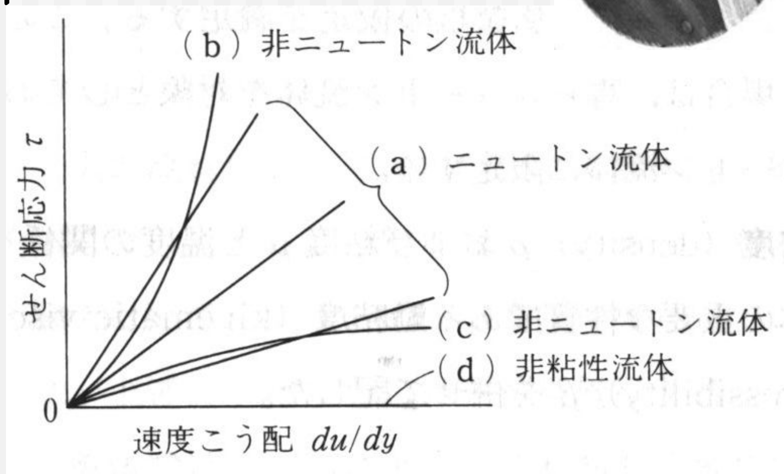


- 流体の粘性：
  粘っこさ、流れにくさ、くっ付き力

- せん断応力とひずみ(ずり)速度の関係：

$$F \propto \frac{AU}{h} \rightarrow \tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy}$$

- ニュートン流体と非ニュートン流体：
  Newtonian (Non-Newtonian) fluid



- 粘度と動粘度：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

6.流体運動の記述方法 (Lagrandian and Eulerian Method)

- ニュートンの運動法則：質量x加速度＝力

$$F = ma = \frac{d(mv)}{dt} \to m\frac{d^2 r(x,y,z)}{dt^2} = F(f_x, f_y, f_z)$$

- ラグランジュの方法：各々の流体粒子を追う
  独立変数（時刻**t,** 流体粒子の初期位置**(a, b, c)** ）
  従属変数（流体粒子の座標**(x, y, z)**と圧力**p**）

- オイラーの方法：空間位置を通過する粒子を追うー実質微分
  独立変数（時刻**t,** 位置の座標**(x, y, z)** ）
  従属変数（流速**(**$\mathbf{v_x, v_y, v_z}$**)**と圧力**p**）

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial v_x}{\partial x}\frac{dx}{dt} + \frac{\partial v_x}{\partial y}\frac{dy}{dt} + \frac{\partial v_x}{\partial z}\frac{dz}{dt} = \frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial v_x}{\partial x}v_x + \frac{\partial v_x}{\partial y}v_y + \frac{\partial v_x}{\partial z}v_z$$

7.連続の式 (Equation of Continuity)

- 質量流量と質量の変化の釣り合い：質量保存

$$x-sweep:\left[\rho u+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}dx\right]dy-\rho udy$$

$$y-sweep:\left[\rho v+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}dy\right]dx-\rho vdx$$

$$t-sweep:\frac{\partial\rho}{\partial t}+\rho\frac{\partial u}{\partial x}+\rho\frac{\partial v}{\partial y}=0$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\rho div\boldsymbol{V}=0$$

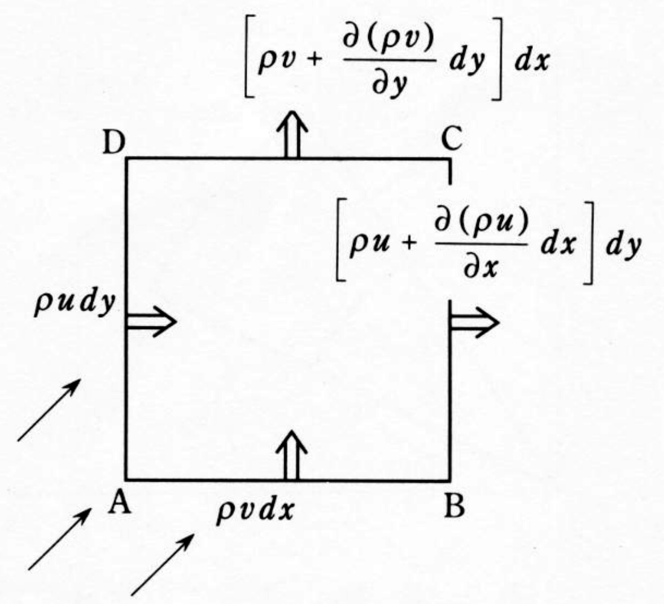


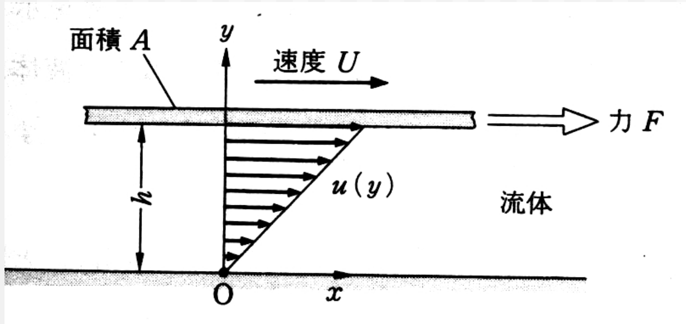
図 2・15　質量流量の出入り

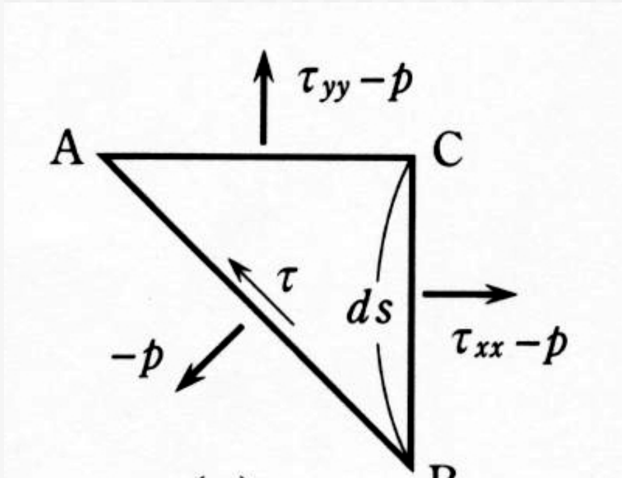
8.ナビエ・ストークス方程式1 (Navier-Stokes Equation)

- せん断応力と垂直応力:

$$\tau_{xy} = \mu\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)$$

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}$$





(a)

8.ナビエ・ストークス方程式2 (Navier-Stokes Equation)

- 運動量の保存則： **F=ma (微小要素)**

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + F_x$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + F_y$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \nu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) + F_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + \nu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) + F_y$$

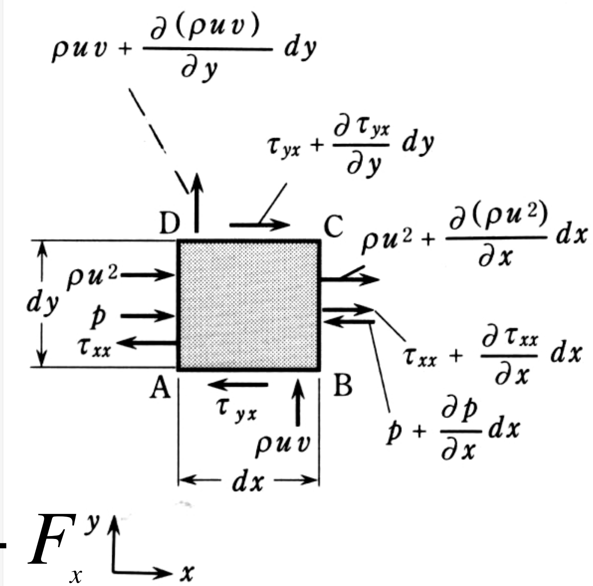


図 5•4　流体要素の運動量のつり合い

$$\frac{DV}{Dt} = F - \frac{1}{\rho} grad p + \nu \nabla^2 V$$

9. 流体性質の分類 (Classification of Fluid)

- **非粘性流体とオイラー方程式:**

$$\frac{D\rho}{Dt}=0, \frac{DV}{Dt}=F-\frac{1}{\rho}gradp$$

- **理想流体とポテンシャル流れ:**

$$\frac{D\rho}{Dt}=0, \frac{DV}{Dt}=F-\frac{1}{\rho}gradp, rotV=0 \Rightarrow V=grad\phi \Rightarrow \nabla^2\phi=0$$

- **流体静力学:**

$$rot\,\mathrm{V}=(\frac{\partial w}{\partial y}-\frac{\partial v}{\partial z},\frac{\partial u}{\partial z}-\frac{\partial w}{\partial x},\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial y})$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}=0, F-\frac{1}{\rho}gradp=0$$

10. 流れの相似則
(Similarity's Law in Flow)

- 現象に関係する物理量の間に同一の相似比（パイナンバー）：

$$\alpha = \frac{q_1}{q_1'} = \frac{q_2}{q_2'} = \frac{q_3}{q_3'} = \dots$$

- 力学的相似則：
  流体現象を支配するいくつかの重要なパイナンバーを一致させることで実用上は十分相似な流れが得られる。

レイノルズ数による力学相似性
(Reynolds Number Dynamics Similarity)

- 粘性流体の特徴を表すレイノルズ数：

Re=慣性力/粘性力

$$\mathrm{Re} = \frac{(\rho U^2 / L) L^3}{(\mu U / L^2) L^3} = \frac{\rho U L}{\mu} = \frac{UL}{\nu}, \nu = \frac{\mu}{\rho}$$

- レイノルズ数の相似性：

同じReをもつ流体現象は似た性質を有する