

応用数値解析特論 第 11 回

～流体力学の方程式～

かつらだ まさし
桂田 祐史

<http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/ana/>

2020 年 12 月 7 日

目次

1 本日の講義内容、連絡事項

2 流体力学に現れる方程式

- 基本的な用語・記号
 - 流体, 速度, 圧力, 密度
 - ベクトル解析の記号
- 物質微分 $\frac{D}{Dt}$
- 連続の方程式と非圧縮条件
- 応力
- 運動方程式
- 歪み速度テンソル
- Stokes の流体公理, Newton 流体
- 粘性率, 完全流体 (非粘性流体), 粘性流体
- 水と空気の粘性について
- Navier-Stokes 方程式, Stokes 方程式, Euler 方程式
- 境界条件
- 適切な問題のための条件
- Navier-Stokes 方程式の無次元化と Reynolds 数

3 参考文献

本日の講義内容、連絡事項

本日の講義内容、連絡事項

- ① 今回から流体の挙動を表す偏微分方程式に対する有限要素法について解説する。これまでに説明した Poisson 方程式に対する有限要素法とは大きく異なることが、取り上げる第一の理由である (それらの方程式は応用上重要である、ということも理由の一つではあるが)。今回は流体力学の方程式の手短な紹介をする。
すでに学習済みである場合は、スライド PDF をざっと読めば良い。

本日の講義内容、連絡事項

- ① 今回から流体の挙動を表す偏微分方程式に対する有限要素法について解説する。これまでに説明した Poisson 方程式に対する有限要素法とは大きく異なることが、取り上げる第一の理由である (それらの方程式は応用上重要である、ということも理由の一つではあるが)。今回は流体力学の方程式の手短な紹介をする。
すでに学習済みである場合は、**スライド PDF をざっと読めば良い。**
- ② (念のため) 前回の講義で、この科目のレポート課題について説明した。まだ確認していない人は、すぐに確認すること。課題 A のレポート締め切りは 12/19 18:00, 課題 B のレポート締め切りは 2021 年 1/15 18:00 である。課題 B の締め切りには 1ヶ月以上先であるが、間に冬季休暇をはさむので、冬季休暇に入る前に予定を立てて、必要があれば質問すること。

10 流体力学に現れる方程式

今回は、流体力学に現れる有名な方程式をざっと紹介する。

10 流体力学に現れる方程式

今回は、流体力学に現れる有名な方程式をざっと紹介する。

ここでは「なぜそうなるか」については省いた、端折った説明をする。

10 流体力学に現れる方程式

今回は、流体力学に現れる有名な方程式をざっと紹介する。

ここでは「なぜそうなるか」については省いた、端折った説明をする。

学部で開講している「応用複素関数」では時間に余裕があり、少し詳しくに講義できているので、必要に応じてそちらの資料を見て下さい (参考書紹介などもそちらの方を見て下さい)。

- 講義のためのノート
「複素関数と流体力学」

<http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/complex2/intro-fluid.pdf>

- 2020 年度第 5 回講義スライド PDF

http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/lecture/applied-complex-function-2020/AC05_0610.pdf

PDF ファイル名 AC05_0610.pdf のところを mp4/AC05_1.mp4 に置き換えると、動画資料の URL になる (以下は _2, _3, ... と連番)。全部視聴すると 88 分。

10.1 基本的な用語

10.1.1 流体, 速度, 圧力, 密度

流体 (fluid) とは、液体や気体のような “流れるもの” を理想化したものである (Cf. 質点, 剛体, 弾性体)。

10.1 基本的な用語

10.1.1 流体, 速度, 圧力, 密度

流体 (fluid) とは、液体や気体のような “流れるもの” を理想化したものである (Cf. 質点, 剛体, 弾性体)。

速度、圧力、密度、温度については、一応知っていることとする (実は圧力は意外と難しい)。どういう文字で表すか述べ、単位は何か確認しておく。

10.1 基本的な用語

10.1.1 流体, 速度, 圧力, 密度

流体 (fluid) とは、液体や気体のような“流れるもの”を理想化したものである (Cf. 質点, 剛体, 弾性体)。

速度、圧力、密度、温度については、一応知っていることとする (実は圧力は意外と難しい)。どういう文字で表すか述べ、単位は何か確認しておく。

時刻 t , 位置 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)^\top$ (または $\mathbf{x} = (x, y, z)^\top$) における流体の**速度**を $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ と表す (\mathbf{v} と書く場合もある)。 \mathbf{u} の成分を $(u_1, u_2, u_3)^\top$ あるいは $(u, v, w)^\top$ と表す。SI 単位系では、各成分の単位は m/s^2 である。

10.1 基本的な用語

10.1.1 流体, 速度, 圧力, 密度

流体 (fluid) とは、液体や気体のような “流れるもの” を理想化したものである (Cf. 質点, 剛体, 弾性体)。

速度、圧力、密度、温度については、一応知っていることとする (実は圧力は意外と難しい)。どういう文字で表すか述べ、単位は何か確認しておく。

時刻 t , 位置 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)^\top$ (または $\mathbf{x} = (x, y, z)^\top$) における流体の**速度**を $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ と表す (\mathbf{v} と書く場合もある)。 \mathbf{u} の成分を $(u_1, u_2, u_3)^\top$ あるいは $(u, v, w)^\top$ と表す。SI 単位系では、各成分の単位は m/s^2 である。

時刻 t , 位置 \mathbf{x} における流体の**圧力**を $p(\mathbf{x}, t)$ という記号で表す。SI 単位系では、単位は $\text{Pa} = \text{N/m}^2$ である (Pa は「パスカル」と読む)。

1 気圧は $1013 \text{ hPa} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$. 水に 10m 潜ったときの水圧は $1.0 \times 10^3 \cdot 9.8 \cdot 10 = 9.8 \times 10^4 \doteq 10^5 \text{ Pa} \doteq 1 \text{ 気圧}$.

10.1 基本的な用語

10.1.1 流体, 速度, 圧力, 密度

流体 (fluid) とは、液体や気体のような“流れるもの”を理想化したものである (Cf. 質点, 剛体, 弾性体)。

速度、圧力、密度、温度については、一応知っていることとする (実は圧力は意外と難しい)。どういう文字で表すか述べ、単位は何か確認しておく。

時刻 t , 位置 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)^\top$ (または $\mathbf{x} = (x, y, z)^\top$) における流体の**速度**を $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ と表す (\mathbf{v} と書く場合もある)。 \mathbf{u} の成分を $(u_1, u_2, u_3)^\top$ あるいは $(u, v, w)^\top$ と表す。SI 単位系では、各成分の単位は m/s^2 である。

時刻 t , 位置 \mathbf{x} における流体の**圧力**を $p(\mathbf{x}, t)$ という記号で表す。SI 単位系では、単位は $\text{Pa} = \text{N/m}^2$ である (Pa は「パスカル」と読む)。

1 気圧は $1013 \text{ hPa} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$. 水に 10m 潜ったときの水圧は $1.0 \times 10^3 \cdot 9.8 \cdot 10 = 9.8 \times 10^4 \doteq 10^5 \text{ Pa} \doteq 1 \text{ 気圧}$.

流体の**密度**は $\rho(\mathbf{x}, t)$ で表す。 $\rho > 0$ である。SI 単位系では、単位は kg/m^3 である。 0°C では、水の密度は $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 空気の密度は 1.3 kg/m^3 .

10.1 基本的な用語

10.1.1 流体, 速度, 圧力, 密度

流体 (fluid) とは、液体や気体のような“流れるもの”を理想化したものである (Cf. 質点, 剛体, 弾性体)。

速度、圧力、密度、温度については、一応知っていることとする (実は圧力は意外と難しい)。どういう文字で表すか述べ、単位は何か確認しておく。

時刻 t , 位置 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)^\top$ (または $\mathbf{x} = (x, y, z)^\top$) における流体の**速度**を $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ と表す (\mathbf{v} と書く場合もある)。 \mathbf{u} の成分を $(u_1, u_2, u_3)^\top$ あるいは $(u, v, w)^\top$ と表す。SI 単位系では、各成分の単位は m/s^2 である。

時刻 t , 位置 \mathbf{x} における流体の**圧力**を $p(\mathbf{x}, t)$ という記号で表す。SI 単位系では、単位は $\text{Pa} = \text{N/m}^2$ である (Pa は「パスカル」と読む)。

1 気圧は $1013 \text{ hPa} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$. 水に 10m 潜ったときの水圧は $1.0 \times 10^3 \cdot 9.8 \cdot 10 = 9.8 \times 10^4 \approx 10^5 \text{ Pa} \approx 1 \text{ 気圧}$.

流体の**密度**は $\rho(\mathbf{x}, t)$ で表す。 $\rho > 0$ である。SI 単位系では、単位は kg/m^3 である。 0°C では、水の密度は $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 空気の密度は 1.3 kg/m^3 .

流体の**温度**を $\theta(\mathbf{x}, t)$ (あるいは $T(\mathbf{x}, t)$) で表す。SI 単位系では、単位は絶対温度 K (「ケルビン」と読む) であり、 $\theta \geq 0$ が成り立つ。

各時刻 t において、 $\mathbf{u}(\cdot, t)$ はベクトル場、 $p(\cdot, t)$, $\rho(\cdot, t)$, $\theta(\cdot, t)$ はスカラー場である。

10.1.2 ベクトル解析の記号

このスライドでは、 p は一般のスカラー場、 \mathbf{u} は一般のベクトル場とする。

$$\nabla = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} \\ \frac{\partial}{\partial x_2} \\ \frac{\partial}{\partial x_3} \end{pmatrix}, \quad \nabla p = \text{grad } p = \begin{pmatrix} \frac{\partial p}{\partial x_1} \\ \frac{\partial p}{\partial x_2} \\ \frac{\partial p}{\partial x_3} \end{pmatrix},$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \text{div } \mathbf{u} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial u_i}{\partial x_i}, \quad \nabla \times \mathbf{u} = \text{rot } \mathbf{u} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u_3}{\partial x_2} - \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial u_1}{\partial x_3} - \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \\ \frac{\partial u_2}{\partial x_1} - \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \end{pmatrix},$$

$$\Delta p = \nabla^2 p := \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2}, \quad \Delta \mathbf{u} = \nabla^2 \mathbf{u} := \begin{pmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \Delta u_3 \end{pmatrix}.$$

なお流体分野の人は $\nabla \mathbf{u} := (\nabla u_1 \ \nabla u_2 \ \nabla u_3)$ という記法を使うことがある (例えば $E = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^\top)$ のような式を書く)。次式が成り立つことに注意。

$$(\nabla \mathbf{u})^\top = \begin{pmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} & \frac{\partial u_1}{\partial x_2} & \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial u_2}{\partial x_1} & \frac{\partial u_2}{\partial x_2} & \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial u_3}{\partial x_1} & \frac{\partial u_3}{\partial x_2} & \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \end{pmatrix} = \mathbf{u}' \quad (\mathbf{u} \text{ のヤコビ行列}).$$

10.1.2 ベクトル解析の記号

以下の公式は良く知られている。

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad} p) = \Delta p,$$

$$\operatorname{rot}(\operatorname{grad} p) = \mathbf{0},$$

$$\operatorname{div}(\operatorname{rot} \mathbf{u}) = 0,$$

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{u}) = \operatorname{grad}(\operatorname{div} \mathbf{u}) - \Delta \mathbf{u}.$$

(2020/12/13 加筆) $P = (p_{ij})$, $Q = (q_{ij})$ に対して $P : Q$ を次式で定める。

$$P : Q := \sum_{i,j=1}^3 p_{ij} q_{ij}.$$

10.2 物質微分 $\frac{D}{Dt}$

時間依存するスカラー場 f に対し、**物質微分** (material derivative, **Lagrange 微分**) とは、

$$(1) \quad \frac{Df}{Dt} := \frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla f = \frac{\partial f}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial f}{\partial x_i}.$$

で定義される。

10.2 物質微分 $\frac{D}{Dt}$

時間依存するスカラー場 f に対し、**物質微分** (material derivative, **Lagrange 微分**) とは、

$$(1) \quad \frac{Df}{Dt} := \frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla f = \frac{\partial f}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial f}{\partial x_i}.$$

で定義される。流体の流れに沿って運動する粒子 $\mathbf{x}(t)$ (つまり $\mathbf{x}'(t) = \mathbf{u}(\mathbf{x}(t), t)$) に対し

$$\left. \frac{d}{dt} f(\mathbf{x}(t), t) \right|_{t=t_0} = \frac{Df}{Dt}(\mathbf{x}(t_0), t_0)$$

が成り立つ (合成関数の微分法により証明出来る)。

10.2 物質微分 $\frac{D}{Dt}$

時間依存するスカラー場 f に対し、**物質微分** (material derivative, **Lagrange 微分**) とは、

$$(1) \quad \frac{Df}{Dt} := \frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla f = \frac{\partial f}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial f}{\partial x_i}.$$

で定義される。流体の流れに沿って運動する粒子 $\mathbf{x}(t)$ (つまり $\mathbf{x}'(t) = \mathbf{u}(\mathbf{x}(t), t)$) に対し

$$\left. \frac{d}{dt} f(\mathbf{x}(t), t) \right|_{t=t_0} = \frac{Df}{Dt}(\mathbf{x}(t_0), t_0)$$

が成り立つ (合成関数の微分法により証明出来る)。すなわち

流体の流れに沿って運動する粒子から場 f を観測すると、時間変化率は $\frac{Df}{Dt}$

10.2 物質微分 $\frac{D}{Dt}$

時間依存するスカラー場 f に対し、**物質微分** (material derivative, **Lagrange 微分**) とは、

$$(1) \quad \frac{Df}{Dt} := \frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla f = \frac{\partial f}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial f}{\partial x_i}.$$

で定義される。流体の流れに沿って運動する粒子 $\mathbf{x}(t)$ (つまり $\mathbf{x}'(t) = \mathbf{u}(\mathbf{x}(t), t)$) に対し

$$\left. \frac{d}{dt} f(\mathbf{x}(t), t) \right|_{t=t_0} = \frac{Df}{Dt}(\mathbf{x}(t_0), t_0)$$

が成り立つ (合成関数の微分法により証明出来る)。すなわち

流体の流れに沿って運動する粒子から場 f を観測すると、時間変化率は $\frac{Df}{Dt}$

ベクトル場 $\mathbf{f} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t)$ に対しても

$$\frac{D\mathbf{f}}{Dt} := \begin{pmatrix} \frac{Df_1}{Dt} \\ \frac{Df_2}{Dt} \\ \frac{Df_3}{Dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla f_1 \\ \frac{\partial f_2}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla f_2 \\ \frac{\partial f_3}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla f_3 \end{pmatrix}$$

と定める。

10.2 物質微分 $\frac{D}{Dt}$

時間依存するスカラー場 f に対し、**物質微分** (material derivative, **Lagrange 微分**) とは、

$$(1) \quad \frac{Df}{Dt} := \frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla f = \frac{\partial f}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial f}{\partial x_i}.$$

で定義される。流体の流れに沿って運動する粒子 $\mathbf{x}(t)$ (つまり $\mathbf{x}'(t) = \mathbf{u}(\mathbf{x}(t), t)$) に対し

$$\left. \frac{d}{dt} f(\mathbf{x}(t), t) \right|_{t=t_0} = \frac{Df}{Dt}(\mathbf{x}(t_0), t_0)$$

が成り立つ (合成関数の微分法により証明出来る)。すなわち

流体の流れに沿って運動する粒子から場 f を観測すると、時間変化率は $\frac{Df}{Dt}$

ベクトル場 $\mathbf{f} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t)$ に対しても

$$\frac{D\mathbf{f}}{Dt} := \begin{pmatrix} \frac{Df_1}{Dt} \\ \frac{Df_2}{Dt} \\ \frac{Df_3}{Dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla f_1 \\ \frac{\partial f_2}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla f_2 \\ \frac{\partial f_3}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla f_3 \end{pmatrix}$$

と定める。特に \mathbf{f} が流体の速度場 \mathbf{u} であるとき、 $\frac{D\mathbf{u}}{Dt}$ は流体粒子の加速度である。

10.3 連続の方程式と非圧縮条件

質量が保存されるという仮定をすると

$$(2) \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0.$$

これを**連続の方程式** (the continuity equation, the equation of continuity) と呼ぶ。

10.3 連続の方程式と非圧縮条件

質量が保存されるという仮定をすると

$$(2) \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0.$$

これを**連続の方程式** (the continuity equation, the equation of continuity) と呼ぶ。

積の微分法 $\operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = \operatorname{grad} \rho \cdot \mathbf{u} + \rho \operatorname{div} \mathbf{u}$ により、(2) は

$$(3) \quad \frac{D\rho}{Dt} + \rho \operatorname{div} \mathbf{u} = 0$$

と書き直せる。

10.3 連続の方程式と非圧縮条件

質量が保存されるという仮定をすると

$$(2) \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0.$$

これを**連続の方程式** (the continuity equation, the equation of continuity) と呼ぶ。

積の微分法 $\operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = \operatorname{grad} \rho \cdot \mathbf{u} + \rho \operatorname{div} \mathbf{u}$ により、(2) は

$$(3) \quad \frac{D\rho}{Dt} + \rho \operatorname{div} \mathbf{u} = 0$$

と書き直せる。

$\frac{D\rho}{Dt} = 0$ を満たしているとき、その流体は**非圧縮** (incompressible) であるという。この条件は

$$(4) \quad \operatorname{div} \mathbf{u} = 0$$

と同値であるが、こちらの条件は**非圧縮条件** (incompressibility condition) と普通呼ばれる。

(注 ρ が定数ならば非圧縮であるが、非圧縮であることは定数であることを意味しない。)

10.4 応力

流体がモノ (流体自身も含む) に “接触している” とき、流体はモノに力を及ぼす。狭い範囲で考えたとき、力は接触面の面積に (おおむね) 比例する。このことを流体が及ぼす力は**面積力** (surface force) であるという。

10.4 応力

流体がモノ (流体自身も含む) に “接触している” とき、流体はモノに力を及ぼす。狭い範囲で考えたとき、力は接触面の面積に (おおむね) 比例する。このことを流体が及ぼす力は**面積力** (surface force) であるという。

これに対して、重力のような、力が体積に比例する力を**体積力** (body force) という。

10.4 応力

流体がモノ (流体自身も含む) に “接触している” とき、流体はモノに力を及ぼす。狭い範囲で考えたとき、力は接触面の面積に (おおむね) 比例する。このことを流体が及ぼす力は**面積力** (surface force) であるという。

これに対して、重力のような、力が体積に比例する力を**体積力** (body force) という。

面積力の場合、単位面積当たりの力を**応力** (stress) と呼ぶ。これはベクトルであり、各成分の単位は SI 単位系では Pa (パスカル) である。

10.4 応力

流体がモノ (流体自身も含む) に “接触している” とき、流体はモノに力を及ぼす。狭い範囲で考えたとき、力は接触面の面積に (おおむね) 比例する。このことを流体が及ぼす力は**面積力** (surface force) であるという。

これに対して、重力のような、力が体積に比例する力を**体積力** (body force) という。

面積力の場合、単位面積当たりの力を**応力** (stress) と呼ぶ。これはベクトルであり、各成分の単位は SI 単位系では Pa (パスカル) である。

応力は接触面の向きに依存する。接触面の単位法線ベクトルが \mathbf{n} (\mathbf{n} の指す側に流体があり、その反対側にモノがある) であるモノに流体が及ぼす応力を $\mathbf{p}(\mathbf{n})$ と書いて議論する。

10.4.0 応力テンソル

面 $x_i = a_i$ における応力を $\begin{pmatrix} \sigma_{i1} \\ \sigma_{i2} \\ \sigma_{i3} \end{pmatrix}$ とするとき

$$(5) \quad \sigma := (\sigma_{ij}) = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix}$$

とおき、 σ を (Cauchy の) **応力テンソル** (the Cauchy stress tensor) と呼ぶ。

一般に**応力テンソル**は**対称テンソル** ($\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$) である。

また一般に

$$(6) \quad \mathbf{p}(\mathbf{n}) = \sigma \mathbf{n} = \begin{pmatrix} \sigma_{11}n_1 + \sigma_{12}n_2 + \sigma_{13}n_3 \\ \sigma_{21}n_1 + \sigma_{22}n_2 + \sigma_{23}n_3 \\ \sigma_{31}n_1 + \sigma_{32}n_2 + \sigma_{33}n_3 \end{pmatrix}$$

が成り立つ。これは **Cauchy の (公) 式** と呼ばれる (あるいは定理として Cauchy's stress theorem)。

10.5 運動方程式

応力テンソルを用いて表すと、運動方程式は次のように一般的に書ける:

$$(7) \quad \rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \operatorname{div} \sigma.$$

ただし

$$(8) \quad \operatorname{div} \sigma := \begin{pmatrix} \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_3} \\ \frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial x_3} \\ \frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{32}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial x_3} \end{pmatrix} \quad (\text{行毎の div}).$$

(証明には、Gauss の発散定理を用いる。)

10.6 歪み速度テンソル

次式で定義される E を**歪み速度テンソル** (**歪テンソル**, strain-rate tensor, rate-of-strain tensor) と呼ぶ:

$$(9) \quad E = E(\mathbf{x}) := (e_{ij}), \quad e_{ij} = e_{ij}(\mathbf{x}) := \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right).$$

(流体の速度場 \mathbf{u} の歪み速度テンソルというのか?)

$I := (\delta_{ij})$ とおき、 I を**単位テンソル**と呼ぶ。

10.7 Stokes の流体公理, Newton 流体

Stokes (1819–1903) は、流体についての仮定を整理して **Stokes の流体公理** にまとめた (一様、等方、 $E = 0$ のとき $P = -pI$ 等々)。それから次式が導かれる。

$$(10) \quad \sigma = \alpha I + \beta E + \gamma E^2.$$

10.7 Stokes の流体公理, Newton 流体

Stokes (1819–1903) は、流体についての仮定を整理して **Stokes の流体公理** にまとめた (一様、等方、 $E = 0$ のとき $P = -pI$ 等々)。それから次式が導かれる。

$$(10) \quad \sigma = \alpha I + \beta E + \gamma E^2.$$

さらに **Newton 流体** の仮定 (σ は E の 1 次式) をおくと

$$(11) \quad \sigma = (-p + \lambda \operatorname{div} \mathbf{u})I + 2\mu E$$

を得る (岡本・中村 [1] の定理 10.11)。ここで λ, μ は非負定数、 $p = p(\mathbf{x}, t)$ はスカラー関数である。

10.7 Stokes の流体公理, Newton 流体

Stokes (1819–1903) は、流体についての仮定を整理して **Stokes の流体公理** にまとめた (一様、等方、 $E = 0$ のとき $P = -pI$ 等々)。それから次式が導かれる。

$$(10) \quad \sigma = \alpha I + \beta E + \gamma E^2.$$

さらに **Newton 流体** の仮定 (σ は E の 1 次式) をおくと

$$(11) \quad \sigma = (-p + \lambda \operatorname{div} \mathbf{u})I + 2\mu E$$

を得る (岡本・中村 [1] の定理 10.11)。ここで λ, μ は非負定数、 $p = p(\mathbf{x}, t)$ はスカラー関数である。

特に非圧縮な Newton 流体では次式が成り立つ。

$$(12) \quad \sigma = -pI + 2\mu E.$$

μ は **粘性率** (粘性係数, 粘度, viscosity), $p = p(\mathbf{x}, t)$ は **圧力** (pressure) と呼ばれる。

10.7 Stokes の流体公理, Newton 流体

Stokes (1819–1903) は、流体についての仮定を整理して **Stokes の流体公理** にまとめた (一様、等方、 $E = 0$ のとき $P = -pI$ 等々)。それから次式が導かれる。

$$(10) \quad \sigma = \alpha I + \beta E + \gamma E^2.$$

さらに **Newton 流体** の仮定 (σ は E の 1 次式) をおくと

$$(11) \quad \sigma = (-p + \lambda \operatorname{div} \mathbf{u})I + 2\mu E$$

を得る (岡本・中村 [1] の定理 10.11)。ここで λ, μ は非負定数、 $p = p(\mathbf{x}, t)$ はスカラー関数である。

特に非圧縮な Newton 流体では次式が成り立つ。

$$(12) \quad \sigma = -pI + 2\mu E.$$

μ は **粘性率** (粘性係数, 粘度, viscosity), $p = p(\mathbf{x}, t)$ は **圧力** (pressure) と呼ばれる。

(独白) 最近 $\operatorname{div} \mathbf{u} = 0$ を仮定しない、圧縮性流体の研究が盛んになってきた。私は門外漢なので、 λ, μ をどう呼び分けるとか、今一つ良く分かっていない。(弾性論だと、それぞれ Lamé の第 1 定数, 第 2 定数 (剛性率) というけれど。)

10.8 粘性率, 完全流体 (非粘性流体), 粘性流体

粘性率を表すのに η という文字を使うこともある。

一般に $\mu \geq 0$ である。 $\mu = 0$ である流体を**完全流体** (perfect fluid)、あるいは**非粘性流体** (inviscid fluid) と呼び、 $\mu > 0$ である流体を**粘性流体** (viscous fluid) と呼ぶ¹。

¹発音をまとめておく: viscosity [viskásəti/viskó:səti], inviscid [invísəd], viscous [vískəs] ↻

10.8 粘性率, 完全流体 (非粘性流体), 粘性流体

粘性率を表すのに η という文字を使うこともある。

一般に $\mu \geq 0$ である。 $\mu = 0$ である流体を**完全流体** (perfect fluid)、あるいは**非粘性流体** (inviscid fluid) と呼び、 $\mu > 0$ である流体を**粘性流体** (viscous fluid) と呼ぶ¹。

ν を

$$(13) \quad \nu := \frac{\mu}{\rho}$$

で定め、**動粘性係数** (動粘性率, 動粘度, kinematic viscosity) と呼ぶ。

¹発音をまとめておく: viscosity [viskásəti/viskó:səti], inviscid [invísəd], viscous [vískəs]

10.9 水と空気の粘性について

SI 単位系では、粘性率と動粘性率の単位はそれぞれ $\text{Pa} \cdot \text{s}$, m^2/s .

- 20°C の場合、水と空気の粘性係数、動粘性係数は次の表の通りである。動粘性率については、空気は水の 10 倍程度の値を取る。

	粘性率	動粘性率
水	1.016×10^{-3}	1.004×10^{-6}
空気	1.83×10^{-5}	1.501×10^{-5}

- サラダ油の粘性係数は、水の粘性係数の 60 ~ 80 倍程度である。
- 水の粘性率の温度依存性を図 1 に示す。

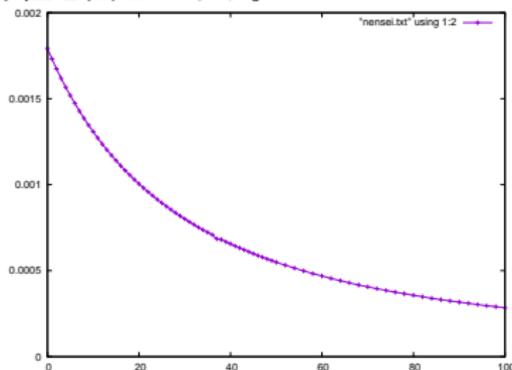


図 1: 水の粘性率の温度依存性

縦軸は粘性率 (単位は $\text{Pa} \cdot \text{s}$), 横軸は温度 (単位は摂氏)

10.10 Navier-Stokes 方程式, Stokes 方程式, Euler 方程式

運動方程式 (7) に、非圧縮 Newton 流体の応力テンソルの式 (12) を代入すると

$$(14) \quad \rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\text{grad } p + \mu (\Delta \mathbf{u} + \text{grad div } \mathbf{u}).$$

非圧縮条件を代入して (ρ で割って)

$$(15) \quad \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \Delta \mathbf{u}.$$

これが非圧縮粘性流体の運動方程式として有名な ナヴィエ・ストークス **Naier-Stokes 方程式** である。

10.10 Navier-Stokes 方程式, Stokes 方程式, Euler 方程式

運動方程式 (7) に、非圧縮 Newton 流体の応力テンソルの式 (12) を代入すると

$$(14) \quad \rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\text{grad } p + \mu (\Delta \mathbf{u} + \text{grad div } \mathbf{u}).$$

非圧縮条件を代入して (ρ で割って)

$$(15) \quad \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \Delta \mathbf{u}.$$

これが非圧縮粘性流体の運動方程式として有名な ナヴィエ・ストークス **Navier-Stokes 方程式** である。

物質微分 $D\mathbf{u}/Dt = \partial\mathbf{u}/\partial t + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}$ の非線形項を無視した

$$(16) \quad \frac{\partial\mathbf{u}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \Delta \mathbf{u}$$

を **Stokes 方程式** と呼ぶ。

10.10 Navier-Stokes 方程式, Stokes 方程式, Euler 方程式

運動方程式 (7) に、非圧縮 Newton 流体の応力テンソルの式 (12) を代入すると

$$(14) \quad \rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\text{grad } p + \mu (\Delta \mathbf{u} + \text{grad div } \mathbf{u}).$$

非圧縮条件を代入して (ρ で割って)

$$(15) \quad \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \Delta \mathbf{u}.$$

これが非圧縮粘性流体の運動方程式として有名な ナヴィエ・ストークス **Navier-Stokes 方程式** である。

物質微分 $D\mathbf{u}/Dt = \partial\mathbf{u}/\partial t + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}$ の非線形項を無視した

$$(16) \quad \frac{\partial\mathbf{u}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \Delta \mathbf{u}$$

を **Stokes 方程式** と呼ぶ。

完全流体 (粘性 $\nu = 0$, 非粘性流体) の場合、運動方程式は

$$(17) \quad \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \text{grad } p$$

となる。これを **Euler 方程式** と呼ぶ。

おまけ: 圧縮性流体の運動方程式

圧縮性流体の場合の方程式は

$$(18) \quad \rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\text{grad } p + \mu \Delta \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \text{grad div } \mathbf{u}.$$

10.11 境界条件

境界条件として代表的なものを3つ紹介する (他にもある)。

10.11 境界条件

境界条件として代表的なものを3つ紹介する (他にもある)。

① Dirichlet 境界条件

$$(19) \quad \mathbf{u} = \mathbf{b}$$

のように 境界での流速を指定する条件を Dirichlet 境界条件と呼ぶ。

10.11 境界条件

境界条件として代表的なものを3つ紹介する (他にもある)。

① Dirichlet 境界条件

$$(19) \quad \mathbf{u} = \mathbf{b}$$

のように境界での流速を指定する条件を Dirichlet 境界条件と呼ぶ。

粘性が流体が物体と接触しているところ (個体境界) では、流体粒子は物体にくっついて動かない (物体粒子との相対速度は $\mathbf{0}$) である。粘着境界条件 (no-slip condition) と呼ぶ。例えば物体が静止しているならば、

$$(20) \quad \mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (\text{境界で}).$$

(2020/12/13 追記) $\int_{\partial\Omega} \mathbf{b} \cdot \mathbf{n} \, d\sigma = \int_{\partial\Omega} \operatorname{div} \mathbf{u} \, d\sigma$ であるので、非圧縮流体では、 \mathbf{b} は $\int_{\partial\Omega} \mathbf{b} \cdot \mathbf{n} \, d\sigma = 0$ を満たす必要がある (一般流束条件)。

10.11 境界条件

境界条件として代表的なものを3つ紹介する (他にもある)。

① Dirichlet 境界条件

$$(19) \quad \mathbf{u} = \mathbf{b}$$

のように境界での流速を指定する条件を Dirichlet 境界条件と呼ぶ。

粘性が流体が物体と接触しているところ (個体境界) では、流体粒子は物体にくっついて動かない (物体粒子との相対速度は $\mathbf{0}$) である。粘着境界条件 (no-slip condition) と呼ぶ。例えば物体が静止しているならば、

$$(20) \quad \mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (\text{境界で}).$$

(2020/12/13 追記) $\int_{\partial\Omega} \mathbf{b} \cdot \mathbf{n} \, d\sigma = \int_{\partial\Omega} \operatorname{div} \mathbf{u} \, d\sigma$ であるので、非圧縮流体では、 \mathbf{b}

は $\int_{\partial\Omega} \mathbf{b} \cdot \mathbf{n} \, d\sigma = 0$ を満たす必要がある (一般流束条件)。

② 応力境界条件

境界上で流体の応力 \mathbf{P} が分かっているという状況では

$$(21) \quad \boldsymbol{\sigma} \mathbf{n} = \mathbf{P} \quad (\text{境界で}).$$

(こういう状況がどれくらいあるか分からないが、シミュレーションには良く出て来る。)

10.11 境界条件

③ 滑り境界条件

物体表面で、速度の (物体の) 法線方向の成分が 0 (物体を突き抜けない、物体から剥がれない)、流体の応力の接線成分が 0、という条件をしばしば考える。

10.11 境界条件

③ 滑り境界条件

物体表面で、速度の (物体の) 法線方向の成分が 0 (物体を突き抜けない、物体から剥がれない)、流体の応力の接線成分が 0、という条件をしばしば考える。

(i) 3次元であれば

$$(22) \quad \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0, \quad (\boldsymbol{\sigma} \mathbf{n}) \times \mathbf{n} = \mathbf{0} \quad (\text{境界で})$$

10.11 境界条件

③ 滑り境界条件

物体表面で、速度の (物体の) 法線方向の成分が 0 (物体を突き抜けない、物体から剥がれない)、流体の応力の接線成分が 0、という条件をしばしば考える。

(i) 3次元であれば

$$(22) \quad \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0, \quad (\boldsymbol{\sigma} \mathbf{n}) \times \mathbf{n} = \mathbf{0} \quad (\text{境界で})$$

(ii) 2次元であれば、接線ベクトルを \mathbf{t} として

$$(23) \quad \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0, \quad (\boldsymbol{\sigma} \mathbf{n}) \cdot \mathbf{t} = 0 \quad (\text{境界で}).$$

しばしば「滑り境界条件とは $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0$ のこと」と誤解されるので、2点ほど注意を述べる。

- Ⓐ 完全流体であれば $\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I}$ であるから、(応力テンソルの連続性を仮定すると) $\boldsymbol{\sigma} \mathbf{n} = -p\mathbf{n}$. ゆえに2つ目の方程式は自動的に満たされるので、 $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0$ のみで十分である (と言えないこともない)。
- Ⓑ 変分法的な議論をする場合、2つ目の方程式は、いわゆる“自然境界条件”になり、弱形式に現れないことがある。

10.12 適切な問題のための条件

微分方程式の解を一意に定めるためには、連続の方程式、運動方程式以外に、境界条件や初期条件が必要になる。

²等温変化ならば $\rho \propto p$. 断熱変化ならば、Poisson の法則から $\rho \propto p^{1/\gamma}$, ここで $\gamma (> 1)$ は等エントロピー指数 (isentropic exponent) と呼ばれる定数である。この辺になると温度も変化すると考えるべきなのかもしれない。

10.12 適切な問題のための条件

微分方程式の解を一意に定めるためには、連続の方程式、運動方程式以外に、境界条件や初期条件が必要になる。

この講義では、以下 θ や ρ は定数として議論を行うが、そうでない場合にどうすれば良いか、簡単に説明しておく。

- 温度 θ の変化を考える場合、熱方程式のような方程式を導入することになる。
- 密度 ρ の変化を考える場合は、状態方程式 $\rho = f(p)$ を導入することが多い²。

²等温変化ならば $\rho \propto p$ 。断熱変化ならば、Poisson の法則から $\rho \propto p^{1/\gamma}$ 、ここで $\gamma (> 1)$ は等エントロピー指数 (isentropic exponent) と呼ばれる定数である。この辺になると温度も変化すると考えるべきなのかもしれない。

10.12 適切な問題のための条件

微分方程式の解を一意に定めるためには、連続の方程式、運動方程式以外に、境界条件や初期条件が必要になる。

この講義では、以下 θ や ρ は定数として議論を行うが、そうでない場合にどうすれば良いか、簡単に説明しておく。

- 温度 θ の変化を考える場合、熱方程式のような方程式を導入することになる。
- 密度 ρ の変化を考える場合は、状態方程式 $\rho = f(p)$ を導入することが多い²。

θ や ρ は定数と仮定すると、以下の4つの条件で \mathbf{u} , p が一意的に定まると期待される。

- (a) 非圧縮条件 (連続の方程式)
- (b) 運動方程式 (Navier-Stokes 方程式, Stokes 方程式, Euler 方程式, etc.)
- (c) 流速に関する境界条件
- (d) 流速に関する初期条件 $\mathbf{u}(\mathbf{x}, 0) = \mathbf{u}_0(\mathbf{x}) \quad (\mathbf{x} \in \overline{\Omega})$

²等温変化ならば $\rho \propto p$ 。断熱変化ならば、Poisson の法則から $\rho \propto p^{1/\gamma}$ 、ここで $\gamma (> 1)$ は等エントロピー指数 (isentropic exponent) と呼ばれる定数である。この辺になると温度も変化すると考えるべきなのかもしれない。

10.12 適切な問題のための条件

圧力に関しては、境界条件も初期条件も課さないことに注意しよう。

それとも少し関係するが、圧力はしばしば定数だけの不定さを持つ。実際、 \mathbf{u} , p が (a)–(d) を満たすとき、任意の定数 C に対して \mathbf{u} , $p' = p + C$ が (a)–(d) を満たすことは明らかである。

10.12 適切な問題のための条件

圧力に関しては、境界条件も初期条件も課さないことに注意しよう。

それとも少し関係するが、圧力はしばしば定数だけの不定さを持つ。実際、 \mathbf{u} , p が (a)–(d) を満たすとき、任意の定数 C に対して \mathbf{u} , $p' = p + C$ が (a)–(d) を満たすことは明らかである。

圧力 p を 1 つに定めるには、どこか 1 点での値を指定したり、

$$(24) \quad \int_{\Omega} p(\mathbf{x}, t) d\mathbf{x} = 0 \quad (\text{平均がつねに } 0)$$

という条件をつけたりする必要がある。

10.13 Navier-Stokes 方程式の無次元化と Reynolds 数

考えている問題に現れる長さ、速さについて、何か “代表的な” 値 L, U を取って

$$(25) \quad \mathbf{x}' := \frac{\mathbf{x}}{L}, \quad t' := \frac{t}{L/U}, \quad \mathbf{u}' := \frac{\mathbf{u}}{U}, \quad p' := \frac{1}{\rho U^2} p$$

とおくと、 \mathbf{x}' と t' は無次元の独立変数であり、 \mathbf{u}' と p' は無次元の従属変数である。

10.13 Navier-Stokes 方程式の無次元化と Reynolds 数

考えている問題に現れる長さ、速さについて、何か “代表的な” 値 L, U を取って

$$(25) \quad \mathbf{x}' := \frac{\mathbf{x}}{L}, \quad t' := \frac{t}{L/U}, \quad \mathbf{u}' := \frac{\mathbf{u}}{U}, \quad p' := \frac{1}{\rho U^2} p$$

とおくと、 \mathbf{x}' と t' は無次元の独立変数であり、 \mathbf{u}' と p' は無次元の従属変数である。 \mathbf{x}' についての gradient, Laplacian を ∇', Δ' と書くことにすると

$$(26) \quad \frac{\partial \mathbf{u}'}{\partial t'} + (\mathbf{u}' \cdot \nabla') \mathbf{u}' = -\text{grad}' p' + \frac{1}{R} \Delta' \mathbf{u}'.$$

ただし R は

$$(27) \quad R := \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu}$$

で定義される無次元数 (dimensionless number) で、**Reynolds 数** (the Reynolds number) と呼ばれる。e を添えて R_e と書かれることも多い。

10.13 Navier-Stokes 方程式の無次元化と Reynolds 数

考えている問題に現れる長さ、速さについて、何か “代表的な” 値 L, U を取って

$$(25) \quad \mathbf{x}' := \frac{\mathbf{x}}{L}, \quad t' := \frac{t}{L/U}, \quad \mathbf{u}' := \frac{\mathbf{u}}{U}, \quad p' := \frac{1}{\rho U^2} p$$

とおくと、 \mathbf{x}' と t' は無次元の独立変数であり、 \mathbf{u}' と p' は無次元の従属変数である。 \mathbf{x}' についての gradient, Laplacian を ∇', Δ' と書くことにすると

$$(26) \quad \frac{\partial \mathbf{u}'}{\partial t'} + (\mathbf{u}' \cdot \nabla') \mathbf{u}' = -\text{grad}' p' + \frac{1}{R} \Delta' \mathbf{u}'.$$

ただし R は

$$(27) \quad R := \frac{\rho U L}{\mu} = \frac{U L}{\nu}$$

で定義される無次元数 (dimensionless number) で、**Reynolds 数** (the Reynolds number) と呼ばれる。e を添えて R_e と書かれることも多い。

' を取ると、“無次元化された Navier-Stokes 方程式” が得られる。

$$(28) \quad \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\text{grad } p + \frac{1}{R} \Delta \mathbf{u}.$$

(加筆) Reynolds 数が大きいと、乱流が発生しうるようになり、数学的に扱いづらく、数値計算的にも解きにくくなる。

10.13 Navier-Stokes 方程式の無次元化と Reynolds 数

無次元化方程式 (26) の導出

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial t'}{\partial t} \frac{\partial}{\partial t'} = \frac{U}{L} \frac{\partial}{\partial t'},$$
$$\nabla = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} \\ \frac{\partial}{\partial x_2} \\ \frac{\partial}{\partial x_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x'_1}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial x'_1} \\ \frac{\partial x'_2}{\partial x_2} \frac{\partial}{\partial x'_2} \\ \frac{\partial x'_3}{\partial x_3} \frac{\partial}{\partial x'_3} \end{pmatrix} = \frac{1}{L} \nabla', \quad \Delta = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2}{\partial x_j^2} = \frac{1}{L^2} \Delta'.$$

10.13 Navier-Stokes 方程式の無次元化と Reynolds 数

無次元化方程式 (26) の導出

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial t'}{\partial t} \frac{\partial}{\partial t'} = \frac{U}{L} \frac{\partial}{\partial t'},$$
$$\nabla = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} \\ \frac{\partial}{\partial x_2} \\ \frac{\partial}{\partial x_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x'_1}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial x'_1} \\ \frac{\partial x'_2}{\partial x_2} \frac{\partial}{\partial x'_2} \\ \frac{\partial x'_3}{\partial x_3} \frac{\partial}{\partial x'_3} \end{pmatrix} = \frac{1}{L} \nabla', \quad \Delta = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2}{\partial x_j^2} = \frac{1}{L^2} \Delta'.$$

以上を Navier-Stokes 方程式に代入して

$$\rho \left[\frac{U}{L} \frac{\partial}{\partial t'} Uu' + \left(Uu' \cdot \frac{1}{L} \nabla' \right) Uu' \right] = -\frac{1}{L} \nabla' p + \mu \frac{1}{L^2} \Delta' Uu'.$$

10.13 Navier-Stokes 方程式の無次元化と Reynolds 数

無次元化方程式 (26) の導出

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial t'}{\partial t} \frac{\partial}{\partial t'} = \frac{U}{L} \frac{\partial}{\partial t'},$$
$$\nabla = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} \\ \frac{\partial}{\partial x_2} \\ \frac{\partial}{\partial x_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x'_1}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial x'_1} \\ \frac{\partial x'_2}{\partial x_2} \frac{\partial}{\partial x'_2} \\ \frac{\partial x'_3}{\partial x_3} \frac{\partial}{\partial x'_3} \end{pmatrix} = \frac{1}{L} \nabla', \quad \Delta = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2}{\partial x_j^2} = \frac{1}{L^2} \Delta'.$$

以上を Navier-Stokes 方程式に代入して

$$\rho \left[\frac{U}{L} \frac{\partial}{\partial t'} Uu' + \left(Uu' \cdot \frac{1}{L} \nabla' \right) Uu' \right] = -\frac{1}{L} \nabla' p + \mu \frac{1}{L^2} \Delta' Uu'.$$

左辺、右辺それぞれ整理して

$$\frac{\rho U^2}{L} \left[\frac{\partial u'}{\partial t'} + (u' \cdot \nabla') u' \right] = -\frac{1}{L} \nabla' p + \frac{\mu U}{L^2}.$$

両辺を $\rho U^2/L$ で割ると

$$\frac{\partial u'}{\partial t'} + (u' \cdot \nabla') u' = -\frac{1}{\rho U^2} \nabla' p + \frac{\mu}{\rho U L} \Delta' u'.$$

10.13 Navier-Stokes 方程式の無次元化と Reynolds 数

無次元化方程式 (26) の導出

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial t'}{\partial t} \frac{\partial}{\partial t'} = \frac{U}{L} \frac{\partial}{\partial t'},$$
$$\nabla = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} \\ \frac{\partial}{\partial x_2} \\ \frac{\partial}{\partial x_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x'_1}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial x'_1} \\ \frac{\partial x'_2}{\partial x_2} \frac{\partial}{\partial x'_2} \\ \frac{\partial x'_3}{\partial x_3} \frac{\partial}{\partial x'_3} \end{pmatrix} = \frac{1}{L} \nabla', \quad \Delta = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2}{\partial x_j^2} = \frac{1}{L^2} \Delta'.$$

以上を Navier-Stokes 方程式に代入して

$$\rho \left[\frac{U}{L} \frac{\partial}{\partial t'} Uu' + \left(Uu' \cdot \frac{1}{L} \nabla' \right) Uu' \right] = -\frac{1}{L} \nabla' p + \mu \frac{1}{L^2} \Delta' Uu'.$$

左辺、右辺それぞれ整理して

$$\frac{\rho U^2}{L} \left[\frac{\partial u'}{\partial t'} + (u' \cdot \nabla') u' \right] = -\frac{1}{L} \nabla' p + \frac{\mu U}{L^2}.$$

両辺を $\rho U^2/L$ で割ると

$$\frac{\partial u'}{\partial t'} + (u' \cdot \nabla') u' = -\frac{1}{\rho U^2} \nabla' p + \frac{\mu}{\rho U L} \Delta' u'.$$

p' , R の定義 ($p' = \frac{1}{\rho U^2} p$, $R = \frac{\rho U L}{\mu}$) から、(26) を得る。

参考文献

- [1] 岡本久, 中村周: 関数解析, 岩波書店 (2006/1/26, 2016/11/10 (POD版)), 岩波講座現代数学の基礎 (1996~1999) の分冊を単行本化したもの.