

# 高階の微分方程式

数理工学 第11回

小林 健 / Ken Kobayashi

東京科学大 工学院 経営工学系

2025年11月13日

# 授業で扱う微分方程式のトピック

## 1 階微分方程式

- 変数分離形
- 同次形
- 1 階線形微分方程式 (齊次, 非齊次)
- Bernoulli 型の微分方程式

高階微分方程式  $\rightsquigarrow$  今回

- (特殊な) 2 階微分方程式
- 高階線形微分方程式

ラプラス変換を用いた解法

# 目次

① (階数が下げる) 2 階微分方程式の解法

② 高階線形微分方程式の解法

# 目次

① (階数が下げる) 2 階微分方程式の解法

② 高階線形微分方程式の解法

# 2階微分方程式

## 2階微分方程式の一般形

$x$  を独立変数とする未知関数  $y \equiv y(x)$  が満たす 2 階微分方程式は、ある関数  $F$  を用いて

$$F\left(x, y, \frac{dy}{dx}, \frac{d^2y}{dx^2}\right) = 0$$

と書ける。

ここでは 2 階微分方程式のうち、微分方程式の階数が下げられる

- 未知関数が現れない場合
- 独立変数が現れない場合

それぞれの解法を見る。

# 1 階の微分方程式に帰着できる場合 (未知関数が現れない場合)

一般形:  $F\left(x, \textcolor{red}{y}, \frac{dy}{dx}, \frac{d^2y}{dx^2}\right) = 0$

ケースその 1: 未知関数  $y$  が  $F$  の引数に現れない場合

$$F\left(x, \frac{dy}{dx}, \frac{d^2y}{dx^2}\right) = 0 \quad (1)$$

- $\boxed{z = \frac{dy}{dx}}$  とおくと,  $\frac{dz}{dx} = \frac{d^2y}{dx^2}$ .
- これを方程式 (1) に代入すると

$$F\left(x, \textcolor{blue}{z}, \frac{dz}{dx}\right) = 0$$

となり, これは  $x$  を独立変数,  $\textcolor{blue}{z}$  を未知関数とした 1 階の微分方程式.

- よって一般解  $z(x)$  を求めたあと,  $\textcolor{blue}{z(x)} = \frac{dy}{dx}$  を解けば一般解  $y(x)$  が求まる.

# 1 階の微分方程式に帰着できる場合 (独立変数が現れない場合)

一般形:  $F\left(\textcolor{red}{x}, y, \frac{dy}{dx}, \frac{d^2y}{dx^2}\right) = 0$

## ケースその 2: 独立変数 $x$ が $F$ の引数に現れない場合

$$F\left(y, \frac{dy}{dx}, \frac{d^2y}{dx^2}\right) = 0 \quad (2)$$

- $\boxed{z = \frac{dy}{dx}}$  とおくと, 合成関数の微分より  $\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{dz}{dx} = \left(\frac{dz}{dy}\right)\left(\frac{dy}{dx}\right) = \textcolor{blue}{z} \frac{dz}{dy}$ .
- これを方程式 (2) に代入すると

$$F\left(y, \textcolor{blue}{z}, \textcolor{blue}{z} \frac{dz}{dy}\right) = 0$$

となり, これは  $y$  を独立変数,  $\textcolor{blue}{z}$  を未知関数とする 1 階の微分方程式.

- よって, 一般解  $\textcolor{blue}{z}(y)$  を求めたあと,  $\textcolor{blue}{z}(y) = \frac{dy}{dx}$  を解けば一般解  $y(x)$  が求まる.

## 例題 (未知関数が現れない場合)

次の 2 階微分方程式を解け:

$$x \frac{d^2y}{dx^2} + \frac{dy}{dx} = 0. \quad (3)$$

- $z = \frac{dy}{dx}$  とおくと,  $\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{dz}{dx}$ .
- よってこれらを方程式 (3) に代入すると

$$x \frac{dz}{dx} + z = 0 \quad (4)$$

となり, これは  $z$  を未知関数とする 1 階の微分方程式である.

- 式 (4) は変数分離形であり, 式を整理すると

$$\frac{1}{z} \frac{dz}{dx} = -\frac{1}{x}.$$

- よって両辺の不定積分を求めると、方程式(4)の一般解は

$$\log|z| = -\log|x| + C_1 \quad (C_1 : \text{任意定数})$$

すなわち  $z = \frac{C_1}{x}$  ( $C_1 : \text{任意定数}$ ) となる。

- したがって、元の方程式(3)の一般解を求めるには、

$$\frac{dy}{dx} = \frac{C_1}{x}$$

を解けばよく、両辺を積分すれば

$$y = C_1 \log|x| + C_2 \quad (C_1, C_2 : \text{任意定数})$$

と一般解が求まる。

### 微分方程式の階数と任意定数の個数の関係

- 2階の微分方程式の一般解には2個の任意定数が現れる。
- 一般に  $n$  階の微分方程式の一般解には  $n$  個の任意定数が現れる。

## 例題 (独立変数が現れない場合)

次の 2 階微分方程式を解け:

$$y \left( \frac{d^2y}{dx^2} \right) + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 + 1 = 0. \quad (5)$$

- $z = \frac{dy}{dx}$  とおくと,  $\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{dz}{dx} = z \frac{dz}{dy}$  であり, これらを方程式 (5) に代入すると

$$yz \left( \frac{dz}{dy} \right) + z^2 + 1 = 0.$$

- 式を整理して

$$\frac{dz}{dy} = -\frac{z^2 + 1}{z} \cdot \frac{1}{y} \quad (6)$$

- これは  $y$  を独立変数とした変数分離形の微分方程式であり, その一般解は

$$\int \frac{z}{z^2 + 1} dz = - \int \frac{1}{y} dy + C_1 \quad (C_1 : \text{任意定数})$$

を満たす。

- 両辺の不定積分を計算して

$$\frac{1}{2} \log|z^2 + 1| = -\log|y| + C_1 \quad (C_1 : \text{任意定数})$$

- よって,  $z$  に関する一般解は

$$z^2 + 1 = \frac{C_1^2}{y^2} \quad (C_1 : \text{任意定数}) \quad (7)$$

を満たす。

- $z = \frac{dy}{dx}$  であることを思い出すと, 式 (7) から  $y$  に関する 1 階の微分方程式

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 + 1 = \frac{C_1^2}{y^2} \quad (C_1 : \text{任意定数})$$

すなわち

$$\frac{dy}{dx} = \pm \sqrt{\frac{C_1^2}{y^2} - 1} = \pm \frac{\sqrt{C_1^2 - y^2}}{y}.$$

を得る。

- これは変数分離形であり、その一般解は

$$\pm \int \frac{y}{\sqrt{C_1^2 - y^2}} dy = \int 1 dx + C_2 \quad (C_2 : \text{任意定数})$$

を満たす。

- 両辺の不定積分を計算して、最終的に求める一般解は

$$\pm \sqrt{C_1^2 - y^2} = x + C_2 \quad (C_1, C_2 : \text{任意定数})$$

すなわち

$$y^2 + (x + C_2)^2 = C_1^2 \quad (C_1, C_2 : \text{任意定数})$$

と求まる(陰関数表示)。

# 目次

① (階数が下げる) 2 階微分方程式の解法

② 高階線形微分方程式の解法

# $n$ 階線形微分方程式

## 高階線形微分方程式の一般形

未知関数  $y \equiv y(x)$  に関する  $n$  階の導関数に関する微分方程式

$$\frac{d^n y}{dx^n} + P_{n-1}(x) \frac{d^{n-1}y}{dx^{n-1}} + \cdots + P_1(x) \frac{dy}{dx} + P_0(x)y = Q(x)$$

と書ける微分方程式を  $n$  階線形微分方程式という。

- 未知関数とその導関数に関して線形な微分方程式
- $Q(x) \equiv 0$  の場合は**齊次**, そうでない場合は**非齊次**と呼ぶ。

### ここで考えること

- 係数関数  $P_0(x), P_1(x), \dots, P_{n-1}(x)$  がすべて定数の場合の齊次線形微分方程式

$$\frac{d^n y}{dx^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1}y}{dx^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dx} + a_0 y = 0$$

の解き方。

## 2 階齊次線形微分方程式の解法

### (定数係数) 2 階齊次線形微分方程式

$$\frac{d^2y}{dx^2} + a_1 \frac{dy}{dx} + a_0 y = 0 \quad (8)$$

#### 方針

- (天下り的だが) この微分方程式の解が  $y(x) = e^{\lambda x}$  ( $\lambda$ : 定数) と表されるものとする.
- このとき  $\frac{dy}{dx} = \lambda e^{\lambda x}$ ,  $\frac{d^2y}{dx^2} = \lambda^2 e^{\lambda x}$  であり, これを式 (8) に代入すると
$$(\lambda^2 + a_1 \lambda + a_0) e^{\lambda x} = 0.$$
- よって  $\lambda$  が次の 2 次方程式

$$\lambda^2 + a_1 \lambda + a_0 = 0 \quad (9)$$

の根ならば,  $e^{\lambda x}$  は方程式 (8) の特殊解 (式 (9) を特性方程式とよぶ).

# 特性方程式を用いた解の導出

特性方程式 (9) の (複素数を含む) 根を  $\lambda_1, \lambda_2$  とする.

$\lambda_1 \neq \lambda_2$  のとき

- このとき,

$$y_1(x) = e^{\lambda_1 x}, \quad y_2(x) = e^{\lambda_2 x}$$

は共に方程式 (8) の特殊解である.

- $y_1(x), y_2(x)$  の線形結合で表される関数

$$y(x) = C_1 y_1(x) + C_2 y_2(x)$$

$$= C_1 e^{\lambda_1 x} + C_2 e^{\lambda_2 x} \quad (C_1, C_2 : \text{任意定数})$$

も方程式 (8) の解であり, これが一般解である.

微分方程式 (8) の一般解は, 2 つの 1 次独立な特殊解の線形結合で表される.

## $\lambda_1 = \lambda_2$ のとき

- このとき  $e^{\lambda_1 x} = e^{\lambda_2 x}$  であり、特殊解は一つしか見つからない。
- 実はこの場合、 $y_1(x) = e^{\lambda_1 x}$  に加えて、

$$y_2(x) = xe^{\lambda_1 x}$$

が方程式 (8) の特殊解になっている（以降の例で確認する）。

- よって  $y_1(x), y_2(x)$  の線形結合

$$y(x) = C_1 e^{\lambda_1 x} + C_2 xe^{\lambda_1 x} \quad (C_1, C_2 : \text{任意定数})$$

が方程式 (8) の一般解である。

重複度 2 の根  $\lambda_1$  に対して  $e^{\lambda_1 x}$  と  $xe^{\lambda_1 x}$  は共に微分方程式 (8) の（1 次独立な）特殊解。

## 例題

次の 2 階齊次線形微分方程式を解け:

$$\frac{d^2y}{dx^2} - 4 \frac{dy}{dx} + 4y = 0. \quad (10)$$

- 微分方程式 (10) の特性方程式は  $\lambda^2 - 4\lambda + 4 = 0$  であり, その根は  $\lambda_1 = \lambda_2 = 2$ .
- よって  $y_1 = e^{2x}$  と  $y_2 = xe^{2x}$  はともに齊次方程式 (10) の解である.
- 実際,  $y_2 = xe^{2x}$  を式 (10) の左辺に代入すると

$$\begin{aligned} (\text{左辺}) &= (\cancel{xe^{2x}}'') - 4(\cancel{xe^{2x}})' + 4(xe^{2x}) \\ &= (\cancel{2e^{2x}} + 2(e^{2x} + 2xe^{2x})) - 4(\cancel{e^{2x}} + 2xe^{2x}) + 4(xe^{2x}) \\ &= 4(e^{2x} + xe^{2x}) - 4(e^{2x} + 2xe^{2x}) + 4(xe^{2x}) = 0. \end{aligned}$$

- したがって方程式 (10) の一般解は  $e^{2x}$  と  $xe^{2x}$  の線形結合として次のように書ける:

$$y(x) = C_1 e^{2x} + C_2 x e^{2x} \quad (C_1, C_2 : \text{任意定数}).$$

## 例題

正の実数  $\omega > 0$  を定数とした次の 2 階齊次線形微分方程式を解け

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \omega^2 y = 0. \quad (11)$$

- 微分方程式 (11) の特性方程式は

$$\lambda^2 + \omega^2 = 0$$

であり、その根は  $\lambda_1 = +\omega i, \lambda_2 = -\omega i$ .

- よって  $y_1 = e^{\omega ix}$  と  $y_2 = e^{-\omega ix}$  はともに齊次方程式 (11) の解であり、その線形結合

$$y(x) = C_1 e^{\omega ix} + C_2 e^{-\omega ix} \quad (C_1, C_2 : \text{任意定数})$$

が方程式 (11) の一般解である。

~~> 虚数を含む式をもう少し整理する。

- オイラーの公式  $e^{\alpha+i\beta} = e^\alpha(\cos \beta + i \sin \beta)$  を用いると、一般解  $y$  は

$$\begin{aligned}
 y(x) &= C_1 e^{\omega i x} + C_2 e^{-\omega i x} \\
 &= C_1 (\cos \omega x + i \sin \omega x) + C_2 (\cos(-\omega x) + i \sin(-\omega x)) \\
 &= \underbrace{(C_1 + C_2)}_{=C_1} \cos \omega x + \underbrace{i(C_1 - C_2)}_{=C_2} \sin \omega x \\
 &= C_1 \cos \omega x + C_2 \sin \omega x \quad (C_1, C_2 : \text{任意定数})
 \end{aligned}$$

と書き直せる。

### 補足

- $m > 0, k > 0$  を定数として  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$  とおくと、方程式 (11) は次のように書ける：

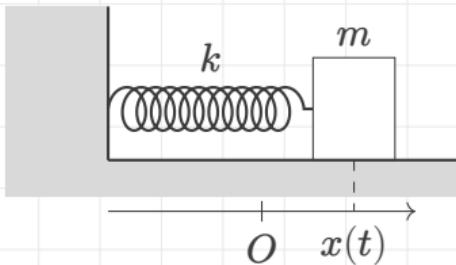
$$m \frac{d^2 y}{dx^2} = -ky.$$

- これは質量  $m$  の物体がばね定数  $k$  のばねに繋がれている単振動の運動方程式。

# 興味ある人向けの例題

## 速度に比例する抵抗力を受ける運動方程式

- 質量  $m$  の物体がばねに繋がれているとする。
- 時刻  $t$  における物体の変位を  $x(t)$  とし、物体には次の力が水平方向に働く：  
ばねの復元力:  $-m\omega^2 x$  ( $\omega > 0$ ),  
物体の速度に比例する抵抗力:  $-2m\phi \frac{dx}{dt}$  ( $\phi > 0$ )
- この物体の運動方程式を  $x(t)$  に関する微分方程式として表し、一般解を求めよ。



**ヒント** (1)  $\phi = \omega$ , (2)  $\phi > \omega$ , (3)  $\phi < \omega$  の 3 つに場合分けして一般解を求める。

# 運動方程式の解の様子

初期条件を  $x(0) = 1$ ,  $\frac{dx}{dt}(0) = 0$  としたときの特殊解の様子:

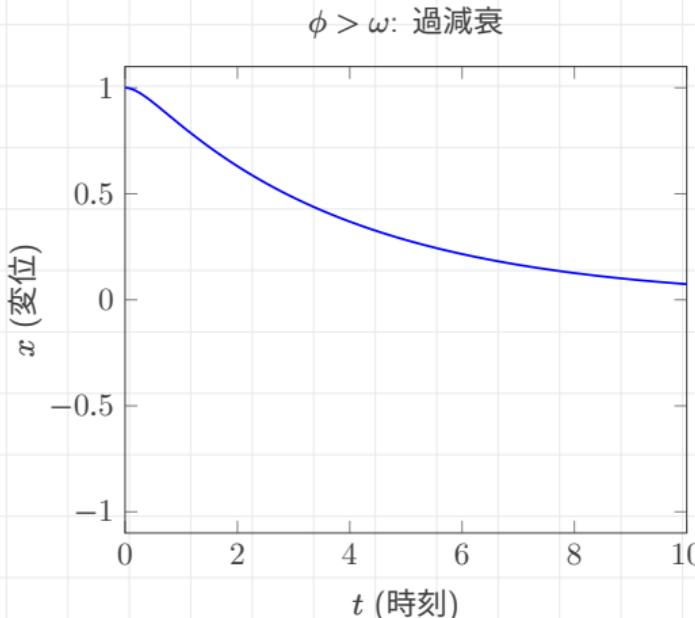


Figure:  $\omega = 1$ ,  $\phi = 2$  の場合

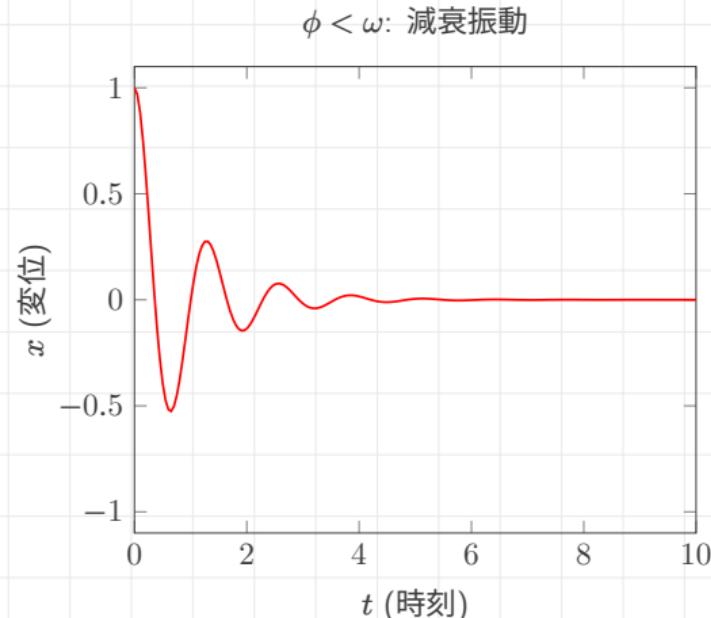


Figure:  $\phi = 1$ ,  $\omega = 5$  の場合

# $n$ 階齊次線形微分方程式の解法

(定数係数)  $n$  階齊次線形微分方程式

$$\frac{d^n y}{dx^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dx^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dx} + a_0 y = 0 \quad (12)$$

- この微分方程式の特性方程式は

$$\lambda^n + a_{n-1} \lambda^{n-1} + \cdots + a_1 \lambda + a_0 = 0.$$

特性方程式が  $n$  個の相異なる根  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  を持つとき (重根を持たない場合)

- このとき  $e^{\lambda_1 x}, e^{\lambda_2 x}, \dots, e^{\lambda_n x}$  はすべて齊次方程式 (12) の解.
- これら  $n$  個の解の線形結合

$$y(x) = C_1 e^{\lambda_1 x} + C_2 e^{\lambda_2 x} + \cdots + C_n e^{\lambda_n x} \quad (C_1, C_2, \dots, C_n : \text{任意定数})$$

が齊次方程式 (12) の一般解である.

## 特性方程式が重根をもつ場合

- 相異なる  $\ell$  個の根  $\lambda_i$  ( $i = 1, 2, \dots, \ell$ ) (ただし  $\ell \leq n$ ) それぞれに対し,  
その重複度  $m_i$  に対応する個数の特殊解

$$e^{\lambda_i x}, \quad x e^{\lambda_i x}, \quad x^2 e^{\lambda_i x}, \dots, x^{m_i - 1} e^{\lambda_i x}$$

が存在する。

- すべての根に対する上記の解を集めると、合計で  $n$  個の特殊解  $y_1, y_2, \dots, y_n$  が得られ、  
その線形結合

$$y(x) = C_1 y_1 + C_2 y_2 + \dots + C_n y_n \quad (C_1, C_2, \dots, C_n : \text{任意定数})$$

が齊次方程式 (12) の一般解である。

## 特性方程式を用いた一般解

- 相異なる  $\ell$  個の根を  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_\ell$  (ただし  $\ell \leq n$ ).  
それぞれの重複度を  $m_1, m_2, \dots, m_\ell$  とする ( $m_1 + m_2 + \dots + m_\ell = n$ ).
- このとき,

$$\left\{ \begin{array}{ll} e^{\lambda_1 x}, xe^{\lambda_1 x}, \dots, x^{m_1-1}e^{\lambda_1 x} & (m_1 \text{個}) \\ e^{\lambda_2 x}, xe^{\lambda_2 x}, \dots, x^{m_2-1}e^{\lambda_2 x} & (m_2 \text{個}) \\ \dots \\ e^{\lambda_\ell x}, xe^{\lambda_\ell x}, \dots, x^{m_\ell-1}e^{\lambda_\ell x} & (m_\ell \text{個}) \end{array} \right. \quad (m_1 + m_2 + \dots + m_\ell = n)$$

はすべて斎次方程式 (12) の解であり, これら  $n$  個の解の線形結合が一般解である.

## 例題

次の 3 階齊次線形微分方程式を特性方程式を用いて解け:

$$\frac{d^3y}{dx^3} - \frac{d^2y}{dx^2} - \frac{dy}{dx} + y = 0. \quad (13)$$

- 微分方程式 (13) の特性方程式は

$$\lambda^3 - \lambda^2 - \lambda + 1 = 0 \iff (\lambda + 1)(\lambda - 1)^2 = 0.$$

- よって特性方程式の根は  $\lambda_1 = -1$  (重複度 1),  $\lambda_2 = 1$  (重複度 2).
- したがって  $e^{-x}$ ,  $e^x$ ,  $xe^x$  は方程式 (13) の解である.
- 以上より, 方程式 (13) の一般解は  $e^{-x}$ ,  $e^x$ ,  $xe^x$  の線形結合

$$y(x) = C_1 e^{-x} + C_2 e^x + C_3 x e^x \quad (C_1, C_2, C_3 : \text{任意定数})$$

と表される.

# まとめ

## 講義の振り返り

- 階数が下げられる 2 階微分方程式の解法  
(未知関数が現れない場合, 独立変数が現れない場合)
- 定数係数の  $n$  階齊次線形微分方程式に対する特性方程式を用いた解法

## 自宅での復習

- 2 階微分方程式で, 階数を下げる変数変換の流れと計算を復習する.
- 特性方程式に基づく解き方の流れを復習する (特に特性方程式が重根をもつ場合)