

# 解けて欲しい微分方程式達

2019-06-29作成

黒木 玄

2019-06-29 作成

2019-07-02 完全微分方程式, Riccati, Clairaut

定数係数の線形常微分方程式

$$\frac{d}{dx}^n u = p_0 u + p_1 u' + \dots + p_n u^{(n)}, \quad p_0, p_1, \dots, p_n \text{ は定数.}$$

$$(1) \quad (\frac{d}{dx}^n + p_0 \frac{d}{dx}^{n-1} + \dots + p_{n-1} \frac{d}{dx} + p_n) u = u^{(n)} + p_0 u^{(n-1)} + \dots + p_{n-1} u' + p_n u = 0.$$

**解き方**  $\lambda^n + p_0 \lambda^{n-1} + \dots + p_{n-1} \lambda + p_n = (\lambda - \alpha_1)^{m_1} \cdots (\lambda - \alpha_s)^{m_s}$ ,  $\alpha_i$  は互いに異なるとえよとせ,

方程式 (1) の一般解は

$$(2) \quad u(x) = \sum_{i=1}^s \sum_{k=0}^{m_i-1} a_{ik} x^k e^{\alpha_i x}, \quad a_{ik} \text{ は定数}$$

と一意に表わされる. ただし  $m_1 = \dots = m_s = 1$  (重根がない場合) には (2) は

$$u(x) = a_1 e^{\alpha_1 x} + \dots + a_n e^{\alpha_n x}, \quad a_i \text{ は定数}$$

の形になる. 定数  $a_{ik}$  ( $i < 1$  は  $a_i$ ) たゞは他の条件によって決定される.  $\square$

**例**  $(\frac{d}{dx}^2 + \omega^2) u = 0, \omega > 0$  の解は  $e^{\pm i \omega x} = \cos(\omega x) \pm i \sin(\omega x)$  を使うと,

$$u(x) = a e^{i \omega x} + b e^{-i \omega x} = A \cos(\omega x) + B \sin(\omega x).$$

と書けよ. ここで  $A = a + b, B = i(a - b)$ . こゝに条件  $u(0) = a, u'(0) = b$  を満足す,

$$u(x) = a \cos(\omega x) + \frac{b}{\omega} \sin(\omega x), \quad \square$$

**例**  $(\frac{d}{dx}^2 + 5\frac{d}{dx} + 6) u = u'' + 5u' + 6u = 0, u(0) = a, u'(0) = b$  の解を求める.

$$\lambda^2 + 5\lambda + 6 = (\lambda + 2)(\lambda + 3) = 0 \text{ の解は } \lambda = -2, -3 \text{ である}, \quad u'' + 5u' + 6u = 0 \text{ の解は}$$

$$u(x) = A e^{-2x} + B e^{-3x}$$

と書けよ. ここで,  $u'(x) = -2A e^{-2x} - 3B e^{-3x}$  である,

$$u(0) = A + B = a, \quad u'(0) = -2A - 3B = b. \quad \begin{matrix} ① \\ ② \end{matrix}$$

これは,

$$3 \times ① + ②: \quad A = 3a + b,$$

$$2 \times ① + ②: \quad -B = 2a + b, \quad B = -2a - b$$

と解けよ. 解は,

$$u(x) = (3a + b) e^{-2x} + (-2a - b) e^{-3x}. \quad \square$$

**例**  $(\frac{d}{dx}^2 + \omega^2)^2 u = 0$  の解は  $e^{\pm i \omega x}, x e^{\pm i \omega x}$  の一次結合を書けよ  $e^{\pm i \omega x} = \cos(\omega x) \pm i \sin(\omega x)$

を代入すると, 解は

$$u(x) = a \cos(\omega x) + b \sin(\omega x) + c x \cos(\omega x) + d x \sin(\omega x)$$

と表わされることがわかる  $\square$

強制振動付きの調和振動子  $\alpha, \omega > 0$  とす。  $u = u(t)$ ,  $\partial = \frac{\partial}{\partial t}$  とす。

$$(*) (\partial^2 + \omega^2) u = p \cos(\alpha t) + q \sin(\alpha t).$$

**解法**  $(*)$  の右辺を  $V$  と書くと,  $V$  は  $(\partial^2 + \alpha^2) V = 0$  の解にすぎない。つまり  $(*)$  は

$$(*)' (\partial^2 + \alpha^2)(\partial^2 + \omega^2) u = (\partial^2 + \alpha^2) V = 0$$

と書き直される。 $(\lambda^2 + \alpha^2)(\lambda^2 + \omega^2) = (\lambda - i\alpha)(\lambda + i\alpha)(\lambda - i\omega)(\lambda + i\omega)$  が重根を持たない場合 ( $\alpha \neq \omega$ ) と持つ場合 ( $\alpha = \omega$ ) の場合分けして考えよう。

$\alpha \neq \omega$  のとき,  $(*)'$  の解は

$$u(t) = a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t) + c \cos(\alpha t) + d \sin(\alpha t)$$

と書ける。このとき

$$\ddot{u}(t) = -\omega^2(a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t)) - \alpha^2(c \cos(\alpha t) + d \sin(\alpha t)),$$

$$\therefore (\partial^2 + \omega^2) u = (\omega^2 - \alpha^2)(c \cos(\alpha t) + d \sin(\alpha t)).$$

これを  $(*)$  と比較すると,

$$c = \frac{p}{\omega^2 - \alpha^2}, \quad d = \frac{q}{\omega^2 - \alpha^2}$$

である。  $u(t)$  は  $(*)$  の解であることを示す。  $(*)$  の解。

$$u(t) = a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t) + \frac{p}{\omega^2 - \alpha^2} \cos(\alpha t) + \frac{q}{\omega^2 - \alpha^2} \sin(\alpha t)$$

$\alpha = \omega$  のとき,  $(*)'$  の解は

$$u(t) = a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t) + ct \cos(\omega t) + dt \sin(\omega t)$$

と書ける。このとき,  $(fg)'' = f''g + 2f'g' + fg''$  で  $f = ct, dt$ ,  $g = \cos(\omega t), \sin(\omega t)$  を使うと,

$$\ddot{u}(t) = -\omega^2 u(t) - 2\omega c \sin(\omega t) + 2\omega d \cos(\omega t),$$

$$(\partial^2 + \omega^2) u(t) = -2\omega c \sin(\omega t) + 2\omega d \cos(\omega t)$$

より  $n$ ,  $c = -\frac{q}{2\omega}$ ,  $d = \frac{p}{2\omega}$  とくと,  $u(t)$  は  $(*)$  の解。  $(*)$  の解。

$$u(t) = a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t) - \frac{q}{2\omega} t \cos(\omega t) + \frac{p}{2\omega} t \sin(\omega t). \quad \square$$

**例** 方程式  $\ddot{u}(t) + u(t) = \sin t$ ,  $u(0) = 1$ ,  $\dot{u}(0) = 0$  の解を求めよ。

$$u(t) = a \cos t + b \sin t - \frac{1}{2}t \cos t \text{ のとき}, \quad \ddot{u}(t) = -u(t) + \sin t.$$

$$u(0) = a = 1, \quad \dot{u}(t) = -a \sin t + b \cos t - \frac{1}{2} \cos t + \frac{1}{2}t \sin t, \quad \dot{u}(0) = b - \frac{1}{2} = 0, \quad b = \frac{1}{2}$$

$$u(t) = \cos t + \frac{1}{2} \sin t - \frac{1}{2}t \cos t.$$

$$\begin{aligned} & (\cos t)'' \\ &= (-t \sin t + \cos t)' \\ &= -t \cos t - \sin t - \sin t \\ &= -t \cos t - 2 \sin t \end{aligned}$$

In[1]:= lode1 = {u'[t] + u[t] == Sin[t], u[0] == 1, u'[0] == 0}

正弦

In[4]:= DSolve[lode1, u[t], t] // Simplify // Expand

微分方程式を解く 簡単な形式に 展開

Out[4]=  $\left\{ u[t] \rightarrow \cos[t] - \frac{1}{2}t \cos[t] + \frac{\sin[t]}{2} \right\}$

单独1階の線形常微分方程式

$$u = u(x), \quad \partial = \frac{\partial}{\partial x}$$

$$(*) \quad u'(x) = a(x)u(x).$$

**解法**  $u(x) = u(0)e^{\int_0^x a(y)dy}.$   $\square$

**例**  $u'(x) = -x u(x)$  の解は,  $\int_0^x (-y)dy = -\frac{x^2}{2} + 1$ ,  $u(x) = u(0)e^{-\frac{x^2}{2}}.$   $\square$

单独1階の非齊次線形常微分方程式

$$(*) \quad u'(x) = a(x)u(x) + b(x). \quad \text{定数変化法}$$

**解法**  $u(x) = c(x)e^{\int_0^x a(y)dy}$  の形で解を構成し,  $u(0) = c(0)$ ,  
 $u'(x) = a(x)c(x)e^{\int_0^x a(y)dy} + c'(x)e^{\int_0^x a(y)dy} = a(x)u(x) + c'(x)e^{\int_0^x a(y)dy},$

これと (\*) を比較すると,  $c'(x) = e^{-\int_0^x a(y)dy}f(x)$ ,  $c(x) = u(0) + \int_0^x e^{-\int_0^z a(z)dz}b(z)dz$  が得,  
 $u(x)$  は (\*) の解である, (\*) の解は  $u(x) + \int_0^x e^{-\int_0^z a(z)dz}b(z)dz$  である.

$$u(x) = c(x)e^{\int_0^x a(y)dy} = u(0)e^{\int_0^x a(y)dy} + \int_0^x e^{\int_z^x a(z)dz}b(z)dz.$$

**確認問題**  $u(x) = u(0)e^{\int_0^x a(y)dy} + \int_0^x e^{\int_z^x a(z)dz}b(z)dz$  である,

$$u'(x) = a(x)u(0)e^{\int_0^x a(y)dy} + a(x)\int_0^x e^{\int_z^x a(z)dz}b(z)dz + e^{\int_x^x a(z)dz}b(x) = a(x)u(x) + b(x), \quad \square$$

**例**  $u'(x) = -x u(x) + x$  を解く,

$$\int_z^x (-y)dy = \left[ -\frac{y^2}{2} \right]_{y=z}^{y=x} = -\frac{x^2}{2} + \frac{z^2}{2},$$

$$\int_0^x e^{\frac{z^2}{2}} z dz = \left[ e^{\frac{z^2}{2}} \right]_{z=0}^{z=x} = e^{\frac{x^2}{2}} - 1$$

"207"

$$u(x) = u(0)e^{-\frac{x^2}{2}} + e^{-\frac{x^2}{2}} \left( e^{\frac{x^2}{2}} - 1 \right) = u(0)e^{-\frac{x^2}{2}} + 1 - e^{-\frac{x^2}{2}}.$$

**確認問題** そのとき,  $-x u(x) + x = -x(u(x) - 1) = -x u(0)e^{-\frac{x^2}{2}} + x e^{-\frac{x^2}{2}},$

$$u'(x) = -x u(0)e^{-\frac{x^2}{2}} + x e^{-\frac{x^2}{2}} \xrightarrow{\text{等しい}} \text{OK.} \quad \square$$

ベルヌイ  
Bernoulli 方程式

$$(*) \quad y'(x) = a(x)y(x) + b(x)y(x)^\alpha \quad (\alpha \neq 1 \text{ と仮定}).$$

**解法**  $(*) \Leftrightarrow y^{-\alpha}y' = a(x)y^{1-\alpha} + b(x) \text{ となる}, \quad (y^{1-\alpha})' = (1-\alpha)y^{-\alpha}y' \text{ ので}$

$$(*) \Leftrightarrow \frac{1}{1-\alpha}(y^{1-\alpha})' = a(x)y^{1-\alpha} + b(x).$$

ゆえに,  $u = y^{1-\alpha}$  とおくと,

$$(*) \Leftrightarrow u' = (1-\alpha)a(x)u + (1-\alpha)b(x)$$

これは  $u$  に関する單純1階の非齊次線形常微分方程式  $u'$  の形で説明した方法で解ける。□

**例題**  $y' = -xy + xy^3$  を解こう。  $u = y^{1-3} = y^{-2}$  とおくと,  $u' = 2xu - 2x$ ,

$u' = 2xu$  の解  $e^{x^2}$  を用いて,  $u = e^{x^2}c(x)$  の形で解を構成する。このとき,  $u' = 2xu + e^{x^2}c'(x)$ ,

この  $u$  が解であることは  $c'(x) = -2xe^{-x^2}$  と同値、これを解くと,  $c(x) = e^{-x^2} + C$ .

このとき,  $u = e^{x^2}c(x) = 1 + Ce^{x^2}$ ,  $y = \pm u^{1/(1-3)} = \pm (1 + Ce^{x^2})^{-\frac{1}{2}}$ . □

# 連立1階の定数係数線形常微分方程式

$\mathbf{U}(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ \vdots \\ u_n(t) \end{bmatrix}$ ,  $A = [a_{ij}]$  は  $n \times n$  の定数行列 とする.

$$(*) \quad \dot{\mathbf{U}}(t) = A \mathbf{U}(t).$$

**解法**  $\mathbf{U}(t) = e^{tA} \mathbf{U}(0)$ ,  $e^{tA} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{t^k}{k!} A^k$ .  $\square$

**例**  $\mathbf{U}(t) = \begin{bmatrix} u(t) \\ v(t) \end{bmatrix}$ ,  $A = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$  のとき,  $A^2 = E$ ,  $e^{tA} = E \cos t + A \sin t = \begin{bmatrix} \cos t & -\sin t \\ \sin t & \cos t \end{bmatrix}$

$\dot{\mathbf{U}}(t) = A \mathbf{U}(t)$  の解は  $\mathbf{U}(t) = \begin{bmatrix} u(t) \\ v(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos t & -\sin t \\ \sin t & \cos t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(0) \\ v(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u(0) \cos t - v(0) \sin t \\ u(0) \sin t + v(0) \cos t \end{bmatrix}$ .  $\square$

**例**  $\ddot{\mathbf{U}}(t) = -\omega^2 \mathbf{U}(t)$  は  $\mathbf{U}(t) = \begin{bmatrix} u(t) \\ \dot{u}(t) \end{bmatrix}$ ,  $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & 0 \end{bmatrix}$  のとき,  $\dot{\mathbf{U}}(t) = A \mathbf{U}(t)$  を書き直される.

$A^2 = -\omega^2 E$  より,  $A^{2k} = (-1)^k \omega^{2k} E = \begin{bmatrix} (-1)^k \omega^{2k} & 0 \\ 0 & (-1)^k \omega^{2k} \end{bmatrix}$ ,  $A^{2k+1} = (-1)^k \omega^{2k} A = \begin{bmatrix} 0 & (-1)^k \omega^{2k} \\ (-1)^{k+1} \omega^{2k+2} & 0 \end{bmatrix}$ .

よって,  $e^{tA} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k (\omega t)^k}{(2k)!} E + \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k \omega^{2k} t^{2k+1}}{(2k+1)!} A = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \omega^{-1} \sin(\omega t) \\ -\omega \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix}$ .

解は次のようになる:

$\mathbf{U}(t) = \begin{bmatrix} u(t) \\ \dot{u}(t) \end{bmatrix} = e^{tA} \begin{bmatrix} u(0) \\ \dot{u}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u(0) \cos(\omega t) + \dot{u}(0) \omega^{-1} \sin(\omega t) \\ -\omega u(0) \sin(\omega t) + \dot{u}(0) \cos(\omega t) \end{bmatrix}$ .

すなはち,  $u(t) = u(0) \cos(\omega t) + \dot{u}(0) \omega^{-1} \sin(\omega t)$ .  $\square$

**例**  $\mathbf{U}(t) = \begin{bmatrix} u(t) \\ v(t) \end{bmatrix}$ ,  $A = \begin{bmatrix} -1 & 3 \\ -4 & 6 \end{bmatrix}$  のときの  $\dot{\mathbf{U}}(t) = A \mathbf{U}(t)$  を解こう.

$A$  を対角化しよう.  $|\lambda E - A| = \lambda^2 - 5\lambda + 6 = (\lambda - 2)(\lambda - 3)$  なので  $A$  の固有値は 2 と 3.

$A$  の固有値 2 の固有ベクトルを  $P = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$  がいとれる.

$A$  の固有値 3 の固有ベクトルを  $Q = \begin{bmatrix} 3 \\ 4 \end{bmatrix}$  がいとれる.

$P = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1 & 4 \end{bmatrix}$  とし,  $P^{-1} = \begin{bmatrix} 4 & -3 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $A = P \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix} P^{-1}$ .

$e^{tA} = P \begin{bmatrix} e^{2t} & 0 \\ 0 & e^{3t} \end{bmatrix} P^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{2t} & 0 \\ 0 & e^{3t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4 & -3 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{2t} & 3e^{3t} \\ e^{2t} & 4e^{3t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4 & -3 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4e^{2t} - 3e^{3t} & -3e^{2t} + 3e^{3t} \\ 4e^{2t} - 4e^{3t} & -3e^{2t} + 4e^{3t} \end{bmatrix}$ .

$\mathbf{U}(t) = e^{tA} \mathbf{U}(0) = \begin{bmatrix} (4u(0) - 3v(0))e^{2t} + (-3u(0) + 3v(0))e^{3t} \\ (4u(0) - 3v(0))e^{2t} + (-4u(0) + 4v(0))e^{3t} \end{bmatrix}$ . ここで  $\mathbf{U}(t)$  の解は  $u(t) = 2, v(t) = 3$ .

**確認**  $\dot{\mathbf{U}}(t) = \begin{bmatrix} (8u(0) - 6v(0))e^{2t} + (-9u(0) + 9v(0))e^{3t} \\ (8u(0) - 6v(0))e^{2t} + (-12u(0) + 12v(0))e^{3t} \end{bmatrix}$ ,  $A \mathbf{U}(t) = \begin{bmatrix} (8u(0) - 6v(0))e^{2t} + (-9u(0) + 9v(0))e^{3t} \\ (8u(0) - 6v(0))e^{2t} + (-12u(0) + 12v(0))e^{3t} \end{bmatrix}$  OK.  $\square$

# 連立1階の非齊次定数係数線形常微分方程式

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ \vdots \\ u_n(t) \end{bmatrix}, \quad A = [a_{ij}] \text{ は定数 } n \times n \text{ 行列}, \quad \mathbf{b}(t) = \begin{bmatrix} b_1(t) \\ \vdots \\ b_n(t) \end{bmatrix}.$$

$$(*) \quad \dot{\mathbf{u}}(t) = A \mathbf{u}(t) + \mathbf{b}(t).$$

**解法**  $\dot{\mathbf{u}}(t) = A \mathbf{u}(t)$  の解  $\mathbf{u}(t) = e^{\lambda t} \mathbf{u}(0)$  の定数ベクトル  $\mathbf{u}(0)$  をベクトル値函数  $\mathbf{C}(t)$  として  
書きかえた次の形の解を探す:

$$\mathbf{u}(t) = e^{\lambda t} \mathbf{C}(t), \quad \text{定数変化法}$$

このとき,  $\mathbf{u}(0) = \mathbf{C}(0)$ ,

$$\dot{\mathbf{u}}(t) = A e^{\lambda t} \mathbf{C}(t) + e^{\lambda t} \dot{\mathbf{C}}(t) = A \mathbf{u}(t) + e^{\lambda t} \dot{\mathbf{C}}(t)$$

左の式, (\*) とこれで比較すると,

$$\dot{\mathbf{C}}(t) = e^{-\lambda t} \mathbf{b}(t), \quad \mathbf{C}(t) = \mathbf{u}(0) + \int_0^t e^{-sA} \mathbf{b}(s) ds$$

ゆえに,  $\mathbf{u}(t)$  は (\*) の解に及ぶ。(\*) の解は

$$\mathbf{u}(t) = e^{\lambda t} \mathbf{C}(t) = e^{\lambda t} \mathbf{u}(0) + \int_0^t e^{(\lambda-s)A} \mathbf{b}(s) ds.$$

**確認** このとき,  $\dot{\mathbf{u}}(t) = A e^{\lambda t} \mathbf{u}(0) + A \int_0^t e^{(\lambda-s)A} \mathbf{b}(s) ds + e^{(\lambda-t)A} \mathbf{b}(t) = A \mathbf{u}(t) + \mathbf{b}(t)$ . OK.  $\square$

**例**  $\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} u(t) \\ v(t) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$  のとき,  $e^{\lambda t} = \begin{bmatrix} \cos \lambda t & -\sin \lambda t \\ \sin \lambda t & \cos \lambda t \end{bmatrix}$  なので,

$$\dot{\mathbf{u}}(t) = A \mathbf{u}(t) + \mathbf{b}(t), \quad \mathbf{b}(t) = \begin{bmatrix} f(t) \\ g(t) \end{bmatrix}$$

の解は,

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(t) &= \begin{bmatrix} u(t) \\ v(t) \end{bmatrix} = e^{\lambda t} \mathbf{u}(0) + \int_0^t e^{(\lambda-s)A} \mathbf{b}(s) ds \\ &= \begin{bmatrix} \cos \lambda t & -\sin \lambda t \\ \sin \lambda t & \cos \lambda t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(0) \\ v(0) \end{bmatrix} + \int_0^t \begin{bmatrix} \cos(\lambda-s) & -\sin(\lambda-s) \\ \sin(\lambda-s) & \cos(\lambda-s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(s) \\ g(s) \end{bmatrix} ds \\ &= \begin{bmatrix} u(0) \cos \lambda t - v(0) \sin \lambda t + \int_0^t (f(s) \cos(\lambda-s) - g(s) \sin(\lambda-s)) ds \\ u(0) \sin \lambda t + v(0) \cos \lambda t + \int_0^t (f(s) \sin(\lambda-s) + g(s) \cos(\lambda-s)) ds \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

左の式,  $f(t)=0, g(t)=-1$  のとき,  $\int_0^t \sin(\lambda-s) ds = \left[ \cos(\lambda-s) \right]_{s=0}^{s=t} = 1 - \cos \lambda t$  なので

$$\begin{cases} u(t) = u(0) \cos \lambda t - v(0) \sin \lambda t + 1 - \cos \lambda t \\ v(t) = u(0) \sin \lambda t + v(0) \cos \lambda t - \sin \lambda t \end{cases}$$

$\left( - \int_0^t \cos(\lambda-s) ds = \left[ \sin(\lambda-s) \right]_{s=0}^{s=t} = -\sin \lambda t \right) \square$

(注)  $v(t) = -\dot{u}(t) \quad \forall t < 12 \rightarrow$

## 一般の強制力付きの調和振動子

$$(*) \quad \ddot{u}(t) = -\omega^2 u(t) + f(t).$$

**解法**  $u(t) = \begin{bmatrix} u(t) \\ \dot{u}(t) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & 0 \end{bmatrix}, \quad b(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ f(t) \end{bmatrix}$  とおくと、(\*)は次のよう書き直される：

$$(*)' \quad \dot{u}(t) = Au(t) + b(t).$$

この(\*)'は次のように解くことがわかる：

$$u(t) = e^{tA} u(0) + \int_0^t e^{(t-s)A} b(s) ds.$$

この場合に、 $e^{tA} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \omega^{-1} \sin(\omega t) \\ -\omega \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix}$  である。

$$u(t) = \begin{bmatrix} u(t) \\ \dot{u}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u(0) \cos(\omega t) + \dot{u}(0) \omega^{-1} \sin(\omega t) + \int_0^t \omega^{-1} \sin(\omega(t-s)) f(s) ds \\ -\omega u(0) \sin(\omega t) + \dot{u}(0) \cos(\omega t) + \int_0^t \cos(\omega(t-s)) f(s) ds \end{bmatrix},$$

(\*)の解は次のように表わされる：

$$u(t) = u(0) \cos(\omega t) + \dot{u}(0) \omega^{-1} \sin(\omega t) + \int_0^t \omega^{-1} \sin(\omega(t-s)) f(s) ds,$$

□

**例題**  $u(t)$  を次のように定めると  $u(t)$  が(\*)を満たしていることを直接確認せよ。

$$\dot{u}(t) = -\omega u(0) \sin(\omega t) + \dot{u}(0) \cos(\omega t) + \int_0^t \cos(\omega(t-s)) f(s) ds + \overbrace{\omega^{-1} \sin(\omega(t-t)) f(t)}^{=0}$$

$$\begin{aligned} \ddot{u}(t) &= -\omega^2 u(0) \cos(\omega t) - \omega^2 \dot{u}(0) \sin(\omega t) - \omega^2 \int_0^t \sin(\omega(t-s)) f(s) ds + \cos(\omega(t-t)) f(t) \\ &= -\omega^2 u(t) + f(t), \end{aligned}$$

□

## 連立1階の(非定数係数の)線形常微分方程式

$E$ は $n \times n$ 単位行列であるとする。

$U(t) = [u_{ij}(t)]$ ,  $A(t) = [a_{ij}(t)]$  は $n \times n$ 行列値函数であるとする。

$$(*) \quad \dot{U}(t) = A(t)U(t), \quad U(0) = E.$$

**解法**  $U(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \int_0^t dt_1 \int_0^{t_1} dt_2 \cdots \int_0^{t_{n-1}} dt_n A(t_1)A(t_2) \cdots A(t_n). \quad \square$

(注)  $U(t)$ の形は一般には具体的にはわからぬ,

**連立1階の非齊次の(非定数係数の)線形常微分方程式**  $U(t)$ は上の $U(t)$ とする。

$$(*) \quad \dot{u}(t) = A(t)u(t) + b(t).$$

**解法**  $u(t) = U(t)C(t)$  の形で解を探す,  $u(0) = C(0)$  かつ

$$\dot{u}(t) = A(t)U(t)C(t) + U(t)\dot{C}(t) = A(t)u(t) + U(t)\dot{C}(t)$$

左の式,  $(*)$ と比較すると,

$$\dot{C}(t) = U(t)^{-1}b(t), \quad C(t) = C(0) + \int_0^t U(s)^{-1}b(s) ds$$

のときの

$$u(t) = U(t)C(t) = U(t)u(0) + \int_0^t U(t)U(s)^{-1}b(s) ds$$

が $(*)$ の解になる。

$\square$

**注意**  $O = \frac{d}{dt}E = \frac{d}{dt}(X(t)X(t)^{-1}) = \dot{X}(t)X(t)^{-1} + X(t)\frac{d(X(t)^{-1})}{dt}$  今この式  
 $\frac{d}{dt}(X(t)^{-1}) = -X(t)^{-1}\dot{X}(t)X(t)^{-1}$

これを使うと, 次を示せる:  $U(t,s) = U(t)U(s)^{-1}$  とおくと,

$$(1) \quad U(t,t) = E,$$

$$(2) \quad \frac{\partial}{\partial t}U(t,s) = A(s)U(t,s),$$

$$(3) \quad \frac{\partial}{\partial s}U(t,s) = -U(t)U(s)^{-1}A(s)U(s)U(s)^{-1} = -U(t)U(s)^{-1}A(s) = -U(t,s)A(s),$$

この3つの条件のうち (1) と (2) (または (1) と (3)) の2つの条件で  $U(t,s)$  が一意に特徴付けられる。  
 $U(t,s)$  は次のように表わされる:

$$\begin{aligned} U(t,s) &= \sum_{k=0}^{\infty} \int_s^t dt_1 \int_s^{t_1} dt_2 \cdots \int_s^{t_{n-1}} dt_n A(t_1)A(t_2) \cdots A(t_n) \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \int_s^t dt_n \int_s^{t_n} dt_{n-1} \cdots \int_s^{t_2} dt_1 A(t_1) \cdots A(t_{n-1})A(t_n). \end{aligned}$$

これが (1), (2), (3) を満たすことを確認せよ

単独2階の線形常微分方程式で「0でない解が1つ分かれている場合」

$$y = \frac{\partial}{\partial x}$$

方程式

$$(*) (\lambda^2 + p(x)\lambda + q(x))u(x) = u''(x) + p(x)u'(x) + q(x)u(x) = 0$$

の0でない解  $f(x)$  加え1つ分かれているとき、 $f(x)$  と一次独立な別の解  $g(x)$  を求めよ。

**解法1**  $g(x) = f(x)c(x)$  ( $c(x)$  は非定数函数) の形で (\*) の解を探してみる。このとき

$$\begin{aligned} g &= f c, \quad g' = f' c + f c', \quad g'' = f'' c + 2f' c' + f c'' \\ \text{左の式} \end{aligned}$$

$$g'' + pg' + qg = (f'' + pf' + qf)c + (2f' + pf)c' + fc''.$$

$g$  が(\*)の解であることを、 $(2f' + pf)c' + fc'' = 0$  は同値であり、それをせたす  $c$  は次のように作れる：

$$c'' = -\left(2\frac{f'}{f} + p\right)c', \quad c'(x) = e^{-\int(2\frac{f'}{f} + p)dx} = f(x)^{-2}e^{-\int p(x)dx}.$$

$$c(x) = \int f(x)^{-2}e^{-\int p(x)dx} dx.$$

このとき、

$$g(x) = f(x) \int f(x)^{-2}e^{-\int p(x)dx} dx.$$

□

**解法2**  $f, g$  が(\*)の一次独立な解のとき、それらのWronskian が  $W(f, g)(x) = e^{-\int p(x)dx}$  となることを使う；  
 $f, g$  のWronskian は  $W = W(f, g) = \begin{vmatrix} f & g \\ f' & g' \end{vmatrix} = fg' - gf'$  と書くと、

$$W' = \underbrace{\begin{vmatrix} f' & g' \\ f' & g' \end{vmatrix}}_{=0} + \begin{vmatrix} f & g \\ f'' & g'' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} f & g \\ -pf' - qf & -pg' - qg \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} f & g \\ -pf' - pg & -pg \end{vmatrix} = -p \begin{vmatrix} f & g \\ f' & g' \end{vmatrix} = -pW$$

なので、 $W = fg' - gf' = e^{-\int p(x)dx}$ 。ゆえに  $g = \frac{f'}{f}g + \frac{1}{f}e^{-\int p(x)dx}$ 。この解を

$g = c(x)e^{\int \frac{f'}{f}dx} = f(x)c(x)$  の形で整理してみる。このとき、 $g' = f'c + fc' = \frac{f'}{f}g + fc'$  ①と②を

比較すると、 $c' = \frac{1}{f^2}e^{-\int p(x)dx}$  なので、このような  $c$  の形で  $c = \int \frac{1}{f^2}e^{-\int p(x)dx} dx$  と作れる。

このとき、

$$g(x) = f c = f(x) \int \frac{1}{f(x)^2}e^{-\int p(x)dx} dx, \quad (\text{これは上の解法1と同じ結果}).$$

□

**例**  $(\lambda-x)(\lambda+x)u(x) = (\lambda^2 - x^2 + 1)u(x) = u''(x) - (x^2 - 1)u(x) = 0$  の解こう。 $(\lambda+x)u(x) = 0$  の解はその解

左の式  $f(x) = e^{-\frac{x^2}{2}}$  は解である。  $f$  と一次独立な解  $g$  は  $g = fc$  ( $c$  は非定数) の形で整理してみる。

ここで、 $g'' - (x^2 - 1)g = (f'' - (x^2 - 1)f)c + 2f'c' + fc'' = 2f'c' + fc''$ 。  $g$  が解であるように  $c$  の形で

$$2f'c' + fc'' = 0, \quad c'' = -2\frac{f'}{f}c', \quad c' = e^{-\int 2\frac{f'}{f}dx} = f^{-2}, \quad c = \int f^{-2}dx$$

と求めることができる。このとき、

$$g(x) = f(x)c(x) = e^{-\frac{x^2}{2}} \int e^{x^2} dx,$$

(\*) の左の式の解は  $u(x) = ae^{-\frac{x^2}{2}} + be^{-\frac{x^2}{2}} \int e^{x^2} dx$  ( $a, b$  は定数) と表わされる。

□

変数分離形

$$y = y(x)$$

$$(*) \frac{dy}{dx} = f(x)g(y),$$

**解法**  $\int \frac{dy}{g(y)} = \int f(x) dx + C$  は ( $y$ の函数)= $(x$ の函数) の形の式になる。これを  $y$ について解くと、 $y = (x\text{の函数})$  が得られる。これが (\*) の解である。□

**例**  $\frac{dv}{dt} = 1+v^2$  を解く。  $\int \frac{dv}{1+v^2} = \int dt + C$ ,  $\arctan v = t+C$ ,  $v = \tan(t+C)$ . □

**補足**  $v = \tan t$  のとき,  $\frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{\sin t}{\cos t} = \frac{\cos t}{\cos^2 t} + \frac{\sin^2 t}{\cos^2 t} = 1 + \tan^2 t = 1+v^2$ . □

**例**  $\frac{dv}{dt} = 1-v^2$  を解く。  $\int \frac{dv}{1-v^2} = \int dt + C$ ,  $\operatorname{arctanh} v = t+C$ ,  $v = \tanh(t+C)$ . □

**補足**  $v = \tanh t = \frac{\sinh t}{\cosh t}$  のとき,  $\frac{dv}{dt} = \frac{\cosh t}{\cosh^2 t} - \frac{\sinh^2 t}{\cosh^2 t} = 1 - \tanh^2 t = 1-v^2$ . □

**例** (-様重力下で落下する物体の速度の慣性抵抗化の時間変化)

$$\frac{dv}{dt} = -1-v|v| = \begin{cases} -1-v^2 & (v \geq 0), \\ -1+v^2 & (v \leq 0). \end{cases}$$

これを解く。

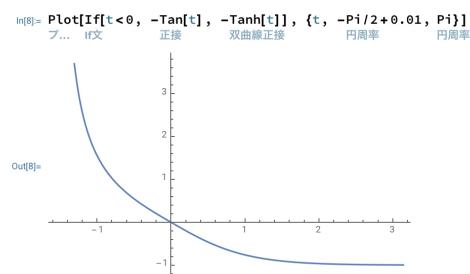
$v \leq 0$  のとき,  $\frac{dv}{dt} = -1-v^2$ ,  $\int \frac{dv}{1-v^2} = -\int dt + C_1$ ,  $\operatorname{arctanh} v = -t+C_1$ ,  $v = -\tanh(t-C_1)$ ,  $t-C_1 \geq 0$

$v \geq 0$  のとき,  $\frac{dv}{dt} = -1-v^2$ ,  $\int \frac{dv}{1-v^2} = -\int dt + C_2$ ,  $\operatorname{arctan} v = -t+C_2$ ,  $v = -\tan(t-C_2)$ ,  $-\frac{\pi}{2} < t-C_2 \leq 0$

この2つが連続的につながるときは  $C=C_1=C_2$  でなければいけない。

$$v(t) = \begin{cases} -\tan(t-C) & \left(-\frac{\pi}{2}+C < t \leq C\right) \\ -\tanh(t-C) & (C \leq t) \end{cases}$$

$C=0$  の場合 →



**補足** 粘性抵抗の場合の運動方程式は  $m \frac{dv}{dt} = -mg - kv$  の形なので適当に単位系とり直せば  $\dot{v} = -1-v$  の形になります。これを解く,

$$\int \frac{dv}{1+v} = -\int dt + C, \quad \log(1+v) = -t+C \quad v = e^{-(t+C)} - 1.$$

$$(\text{確認 } \dot{v} = -e^{-(t+C)}, \quad -1-v = -1-e^{-(t+C)}+1 = -e^{-(t+C)} \text{ OK.})$$

慣性抵抗の場合の運動方程式は  $m \frac{dv}{dt} = -mg - kv|v|$  の形なので適当に単位系とり直せば  $\dot{v} = -1-v|v|$  の形になります。これを解いたのが上の例である。□

例 (logistic equation)  $\frac{dx}{dt} = x(1-x)$  ( $0 < x < 1$ ) を解こう.

$$\int \frac{dx}{x(1-x)} = \int dt + C, \quad \frac{1}{x(1-x)} = \frac{1}{x} + \frac{1}{1-x}, \quad \int \left( \frac{1}{x} + \frac{1}{1-x} \right) dx = t + C,$$

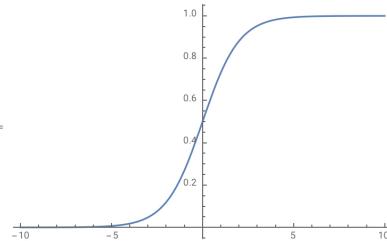
$$\log x - \log(1-x) = t + C, \quad \log \frac{x}{1-x} = t + C, \quad \frac{x}{1-x} = e^{t+C}, \quad x = e^{t+C} - e^{t+C} x$$

$$(1 + e^{t+C})x = e^{t+C}, \quad x = \frac{e^{t+C}}{1 + e^{t+C}} = \frac{1}{1 + e^{-(t+C)}}.$$

解  $x(t) = \frac{1}{1 + e^{-(t+C)}}$  が求まる.

$C=0$  の場合  $\rightarrow$

In[2]:= Plot[1/(1+Exp[-t]), {t, -10, 10}]  
Out[2]= プロット 指数関数



□

例  $\frac{dx}{dt} = x(1-x)$  の  $x > 1$  の場合.  $\int \left( \frac{1}{x} - \frac{1}{x-1} \right) dx = t + C, \quad \log x - \log(x-1) = t + C,$

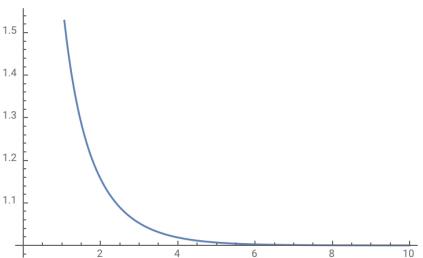
$$\log \frac{x}{x-1} = t + C, \quad \frac{x}{x-1} = e^{t+C}, \quad x = e^{t+C} x - e^{t+C},$$

$$(e^{t+C}-1)x = e^{t+C}, \quad x = \frac{e^{t+C}}{e^{t+C}-1} = \frac{1}{1-e^{-(t+C)}}.$$

$C=0$   
の場合

解  $x(t) = \frac{1}{1-e^{-(t+C)}}$  ( $t+C > 0$ ) が求まる.

In[4]:= Plot[1/(1-Exp[-t]), {t, 0, 10}]  
Out[4]= プロット 指数関数



□

例  $\frac{dx}{dt} = x(1-x)$  の  $x < 0$  の場合.  $\int \left( -\frac{1}{x} + \frac{1}{1-x} \right) dx = t + C, \quad \log(-x) - \log(1-x) = t + C$

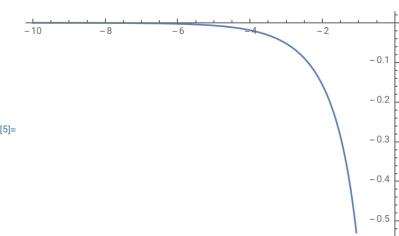
$$\log \frac{-x}{1-x} = t + C, \quad \frac{-x}{1-x} = e^{t+C}, \quad -x = e^{t+C} - e^{t+C} x$$

$$(e^{t+C}-1)x = e^{t+C}, \quad x = \frac{e^{t+C}}{e^{t+C}-1} = \frac{1}{1-e^{-(t+C)}}.$$

$C=0$   
の場合

解  $x(t) = \frac{1}{1-e^{-(t+C)}}$  ( $t+C < 0$ ) が求まる.

In[5]:= Plot[1/(1-Exp[-t]), {t, -10, 0}]  
Out[5]= プロット 指数関数



□

例  $x(t) = \frac{1}{1+C e^{-t}}$  ( $C$  は定数) が  $\frac{dx}{dt} = x(1-x)$  の解であることを示し,  $x_0 \neq 0$  のとき,

$$\dot{x}(t) = \frac{C e^{-t}}{(1+C e^{-t})^2}, \quad x(t)(1-x(t)) = \frac{1}{1+C e^{-t}} \left( 1 - \frac{1}{1+C e^{-t}} \right) = \frac{C e^{-t}}{(1+C e^{-t})^2}, \quad \dot{x}(t) = x(t)(1-x(t)),$$

$$x(0) = \frac{1}{1+C} = x_0, \quad 1 = x_0 + x_0 C, \quad C = x_0^{-1} - 1$$

(\*)の  $x(0) = x_0 \neq 0$  を満たす解は,  $x(t) = \frac{1}{1 + (x_0^{-1} - 1) e^{-t}}$ .

□

注  $x_0 = 0 \Leftrightarrow x_0^{-1} = \infty$  には  $x(t) = 0$  という定数解が対応している □

同次方程式 (\*)  $\frac{dx}{dt} = f\left(\frac{x}{t}\right)$ .

解法  $y = \frac{x}{t}$  に変数変換する。このとき,  $x = ty$  となる。

$$(*) \Leftrightarrow f(y) = \frac{dx}{dt} = y + t \frac{dy}{dt} \Leftrightarrow \frac{dy}{dt} = \frac{f(y) - y}{t} \quad \leftarrow \text{これは変数分離形。}$$

(\*\*) は以下のように解く。

$$\int \frac{dy}{f(y) - y} = \int \frac{dt}{t} + C = \log|t| + C, \quad t = \pm e^{-C} \int \frac{dy}{f(y) - y}.$$

(\*) の逆函数を  $y(t)$  と書くとき, (\*\*) の解は  $x(t) = ty(t)$  と表される。  $\square$

例 (\*)  $\frac{dx}{dt} = e^{\frac{x}{t}} + \frac{x}{t} \quad (t > 0)$  を解こう。  $x = ty$  を代入すると,

$$e^y + y = y + t \frac{dy}{dt}, \quad \frac{dy}{dt} = \frac{e^y}{t}, \quad \int e^{-y} dy = \int \frac{dt}{t} + C, \quad -e^{-y} = \log|t| + C$$

$$e^{-\frac{x}{t}} = \log \frac{1}{|t|} - C, \quad -\frac{x}{t} = \log \left( \log \frac{1}{|t|} - C \right), \quad x = -t \log \left( \log \frac{1}{|t|} - C \right).$$

これで解  $x(t) = -t \log \left( \log \frac{1}{|t|} - C \right)$  が求まる。

確認  $\dot{x}(t) = -\log \left( \log \frac{1}{|t|} - C \right) - t \frac{-\frac{1}{t}}{\log \frac{1}{|t|} - C} = -\log \left( \log \frac{1}{|t|} - C \right) + \frac{1}{\log \frac{1}{|t|} - C}.$

$$e^{\frac{x(t)}{t}} + \frac{x(t)}{t} = \frac{1}{\log \frac{1}{|t|} - C} - \log \left( \log \frac{1}{|t|} - C \right). \quad \stackrel{\text{OK}}{\checkmark}$$

$\square$

$\square$

同次方程式に変換できる場合 (\*)  $\frac{dy}{dx} = f\left(\frac{ax+by+p}{cx+dy+q}\right)$ ,  $(c,d) \neq (0,0)$ .

解法 ①  $p=q=0$  のとき

$$(*) \Leftrightarrow \frac{dy}{dx} = f\left(\frac{ax+by}{cx+dy}\right) = f\left(\frac{a+b(y/x)}{c+d(y/x)}\right)$$

この(\*)は同次方程式となる。

②  $ad-bc=0$  のとき,  $a,b$  で  $a=kc$ ,  $b=kd$  と表わせると “ $u=cx+dy+q$ ” とおく,

$$(*) \Leftrightarrow \frac{dy}{dx} = f\left(\frac{k(cx+dy)+p}{cx+dy+q}\right) = f\left(\frac{k(u-q)+p}{u}\right)$$

このとき

$$\frac{du}{dx} = c + d \frac{dy}{dx} = c + d f\left(\frac{k(u-q)+p}{u}\right) \leftarrow \text{これは変数分離形}.$$

③  $ad-bc \neq 0$  のとき.  $\begin{cases} a\zeta + b\eta = p \\ c\zeta + d\eta = q \end{cases}$  にて  $\zeta, \eta$  が一意に存在する。このとき,  $\begin{cases} X = x + \zeta \\ Y = y + \eta \end{cases}$

とおくと  $\begin{cases} aX+bY = ax+by+p \\ cX+dY = cx+dy+q \end{cases}$  となること,

$$\frac{dY}{dX} = \frac{dy}{dx} = f\left(\frac{aX+bY}{cX+dY}\right) = f\left(\frac{a+b(Y/X)}{c+d(Y/X)}\right). \leftarrow \text{同次方程式.}$$

□

例  $\frac{dy}{dx} \stackrel{(*)}{=} \frac{ax+by+p}{cx+dy+q}$  ( $ad-bc \neq 0$ ,  $c=-b$ ,  $d=1$  と仮定) を解いてみよう.

$$\begin{cases} a\zeta + b\eta = p \\ c\zeta + d\eta = q \end{cases} \text{にて } \zeta, \eta \text{ とく}, \quad \begin{cases} X = x + \zeta \\ Y = y + \eta \end{cases} \text{ とおくと, } (*) \Leftrightarrow \frac{dY}{dX} \stackrel{(*)}{=} \frac{a+b(Y/X)}{c+b(Y/X)}.$$

$$u = \frac{Y}{X} \text{ とおくと, } Y = uX \text{ となる}, \quad X \frac{du}{dX} + u = \frac{a+bu}{c+du}. \quad X \frac{du}{dX} = \frac{a+(b-c)u - du^2}{c+du}.$$

$$\text{ここで } c=-b, d=1 \text{ を使う}, \quad X \frac{du}{dX} = \frac{a-2bu-u^2}{b+u} = -2 \frac{a-2bu-u^2}{\frac{\partial}{\partial u}(a-2bu-u^2)}.$$

$$\int \frac{\frac{\partial}{\partial u}(a-2bu-u^2)}{a-2bu-u^2} du = -2 \int \frac{dX}{X} + C$$

$$\log |a-2bu-u^2| = -2 \log |X| + C = \log |e^Y X^{-2}|$$

$$a-2bu-u^2 = \pm e^Y X^{-2}, \quad C = \pm e^Y \text{ とおく}, \quad (a-2bu-u^2)X^2 = C.$$

$$u = Y/X \text{ 代入すると, } aX^2 - 2bXY - Y^2 = C.$$

$$Y^2 + 2bXY - aX^2 + C = 0, \quad (Y+bX)^2 - (a+b^2)X^2 + C = 0.$$

$$Y = -bX \pm \sqrt{(a+b^2)X^2 - C}.$$

$$X = x + \zeta, \quad Y = y + \eta \text{ 代入すると}$$

$$Y = -\eta - b(x+\zeta) \pm \sqrt{(a+b^2)(x+\zeta)^2 - C}.$$

これが解.

$$p=q=0 \text{ の場合} \rightarrow$$

```
In[1]:= ode3 = {y'[x] == (a x + b y[x]) / (-b x + y[x])}
Out[1]= {y'[x] == a x + b y[x] / (-b x + y[x])}
```

```
In[2]:= DSolve[ode3, y[x], x]
微分方程式を解く
```

```
Out[2]= {y[x] \rightarrow b x - \sqrt{-e^{2 c_1} + a x^2 + b^2 x^2}}, {y[x] \rightarrow b x + \sqrt{-e^{2 c_1} + a x^2 + b^2 x^2}}
```

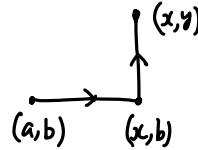
□

完全微分方程式  $f_x(x, y) = p(x, y)$  のとき,

$$(*) \quad df(x, y) = p(x, y) dx + q(x, y) dy \quad (\text{これは } f_x = p, f_y = q \text{ と同値})$$

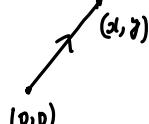
直角座標系で函数  $f(x, y)$  を求めよう.

解法例 1  $f(x, y) = \int_a^x p(s, b) ds + \int_b^y q(x, t) dt.$



確認  $\begin{cases} f_x(a, y) = p(x, b) + \int_b^y q_x(x, t) dt = p(x, b) + \int_b^y p_y(x, t) dt = p(x, b) + [p(x, t)]_{t=b}^{t=y} = p(x, y), \\ f_y(x, y) = q(x, y). \end{cases}$  OK.  $\square$

解法例 2  $f(x, y) = \int_0^1 (p(xt, yt) x + q(xt, yt) y) dt$



確認  $\begin{aligned} f_x(x, y) &= \int_0^1 (p(xt, yt) + p_x(xt, yt) xt + q_x(xt, yt) yt) dt \\ &= \int_0^1 (p(xt, yt) + p_x(xt, yt) xt + p_y(xt, yt) yt) dt \\ &= \int_0^1 \frac{\partial}{\partial t} (p(xt, yt) t) dt = [p(xt, yt) t]_{t=0}^{t=1} = p(x, y). \end{aligned}$

同様に  $f_y(x, y) = q(x, y).$

OK.  $\square$

注意  $f_x = p, f_y = q$  のとき,  $p_y = f_{xy} = f_{yx} = q_x$ ,  $df = p dx + q dy$  が成り立つことは既存の知識である。  
 $p_y = q_x$  という可積分条件が必要である。以上の議論は一般の微分形式に拡張される。  $\square$

例  $df = 2xy dx + (x^2 + \cos y) dy$  を満たす  $f = f(x, y)$  を求めよう.  $p = 2xy, q = x^2 + \cos y$  のとき,

$p_y = 2x = q_x$  で  $q_x$  が可積分条件を満たす。

$$f(x, y) = \int_0^x 2sy ds + \int_0^y (0^2 + \cos t) dt = x^2y + \sin y.$$

確認  $\begin{cases} f_x = 2xy, \\ f_y = x^2 + \cos y. \end{cases}$  OK  $\square$

例  $df = (x^2 - y) dx + (y^2 - x) dy$  を満たす  $f = f(x, y)$  を求めよう.  $(x^2 - y)_y = -1 = (y^2 - x)_x$  とのこと  
 可積分条件を満たす。

$$f(x, y) = \int_0^x (s^2 - y) ds + \int_0^y (t^2 - 0) dt = \frac{x^3}{3} - xy + \frac{y^3}{3}. \quad \text{確認 } \begin{cases} f_x = x^2 - y, \\ f_y = -x + y^2. \end{cases}$$
 OK  $\square$

リッカチ方程式

(\*)  $u'(x) + a(x)u^2 + b(x)u + c(x) = 0$  ( $a(x)$  は 0 でない函数), 以下,  $\partial = \frac{d}{dx}$ .

**解法**  $u(x) = \frac{1}{\psi(x)} \frac{\psi'(x)}{\psi(x)}$  とおこう,  $\psi(x)$  に関する 2 階の線形常微分方程式

$$\left( \partial^2 + \left( b(x) - \frac{a'(x)}{a(x)} \right) \partial + a(x)c(x) \right) \psi(x) = 0$$

に帰着する. 以下はそのことの確認:  $u = \frac{1}{\psi} \frac{\psi'}{\psi}$  のとき,

$$u' = -\frac{a'}{a^2} \frac{\psi'}{\psi} + \frac{1}{a} \frac{\psi''}{\psi} - \frac{1}{a} \left( \frac{\psi'}{\psi} \right)^2, \quad au^2 + bu + c = \frac{1}{a} \left( \frac{\psi'}{\psi} \right)^2 + \frac{b}{a} \frac{\psi'}{\psi} + c \text{ となる},$$

$$u' + au^2 + bu + c = \frac{1}{a\psi} \left( \psi'' + \left( b - \frac{a'}{a} \right) \psi' + ac\psi \right).$$

□

**例**  $\alpha \neq \beta$  が定数のときの  $u' + (u-\alpha)(u-\beta) = 0$  を解こう.  $u = \frac{\psi}{\psi}$  とおこう,

$$\psi'' - (\alpha+\beta)\psi' + \alpha\beta\psi = (\partial - \alpha)(\partial - \beta)\psi = 0$$

を解けばよい. これらの解は  $\psi(x) = a e^{\alpha x} + b e^{\beta x}$  となる,  $u(x) = \frac{a\alpha e^{\alpha x} + b\beta e^{\beta x}}{a e^{\alpha x} + b e^{\beta x}}$ . □

**例**  $\alpha \neq \beta$  が定数のときの  $u' + \frac{1}{x}(u-\alpha)(u-\beta) = 0$  を解こう.  $u = x \frac{\psi}{\psi}$  とおこう,

$$\psi'' - \frac{\alpha+\beta-1}{x}\psi' + \frac{\alpha\beta}{x^2}\psi = \left( \partial - \frac{\beta-1}{x} \right) \left( \partial - \frac{\alpha}{x} \right) \psi = \left( \partial - \frac{\alpha-1}{x} \right) \left( \partial - \frac{\beta}{x} \right) \psi = 0.$$

この解は  $\psi(x) = ax^\alpha + bx^\beta$  となる  $u(x) = x \frac{\psi'(x)}{\psi(x)} = \frac{a\alpha x^\alpha + b\beta x^\beta}{ax^\alpha + bx^\beta}$ . □

□

**例**  $u'(x) - 3u(x)^2 + \frac{2}{x^2} = 0$  を解こう.  $u = -\frac{1}{3} \frac{\psi'}{\psi}$  とおこう,  $\psi'' = \frac{b}{x^2}\psi$  となる  $\psi(x) = ax^3 + bx^{-2}$ ,

$$u(x) = -\frac{1}{3} \frac{\psi'(x)}{\psi(x)} = -\frac{1}{3} \frac{3ax^2 - 2bx^{-3}}{ax^3 + bx^{-2}}.$$

□

クレーロー

### Clairaut 方程式

$$(*) \quad y = xy' - f(y') \quad (y = y(x))$$

#### 解法

(\*) の両辺を微分すると、 $y' = y' + xy'' - f'(y')y''$  すなはち  $y''(x - f'(y')) = 0$ .

$y'' = 0$  のとき  $y'$  は定数となるので、 $y' = p = (\text{定数})$  とおくと、 $y = xp - f(p)$ . これは (\*) の解に含まれる。

$x = f'(y')$  のとき  $f'(y') = x$  と  $y'$ について解いた結果と  $y' = p(x)$  と書くと、 $y = xp(x) - f(p(x))$ .

これも (\*) の解に含まれる。(確認:  $f'(p(x)) = x$ ,  $y = xp(x) - f(p(x))$  のとき,

$$y' = p(x) + xp'(x) - \underbrace{f'(p(x))p'(x)}_{=x} = p(x) \text{ となる}, \quad y = xy' - f(y'). \quad \text{OK.}$$

□

#### 注意

Clairaut 方程式は解析力学や熱統計力学に出て来る Legendre 变換 と関係がある。

□

#### 注意

$y'' = 0$  のときの解  $y = xa - f(a)$  は  $x = f'(y')$  のときの解  $y = xp(x) - f(p(x))$  ( $f'(p(x)) = x$ ) の

接線にならないう。 $y = xp(x) - f(p(x))$ ,  $f'(p(x)) = x$  のとき,  $y' = p(x)$  となる,  $p(x_0) = a$  とすると  $x_0 = x_0$ ,

$x = x_0$  の接する接線は  $y = a(x - x_0) + x_0 \underbrace{p(x_0)}_{=a} - f(\underbrace{p(x_0)}_{=a}) = ax - f(a)$  となる。

□

例  $f(p) = \frac{1}{2}p^2 - d$  ( $d$  は定数) のとき,  $y = xy' - f(y') = xy' - \frac{1}{2}(y')^2 + d$  の解を求めよ。

両辺を微分すると、 $y' = y' + xy'' - y'y''$  すなはち,  $y''(x - y') = 0$ .

$y'' = 0$  のとき 定数  $p$  を  $y'$  に代入して  $y = xp - \frac{1}{2}p^2 + d$  が解になる。

$y' = x$  のとき  $x$  を  $y'$  に代入して  $y = x^2 - \frac{1}{2}x^2 + d = \frac{1}{2}x^2 + d$  が解になる。

□

#### 例

$f(p) = p \log p - p - d$  のとき,  $y = xy' - f(y') = xy' - y \log y' + y' + d$  の解を求めよう。

両辺を微分すると、 $y' = y' + xy'' - y'' \log y' - y'' + y''$  すなはち  $y''(x - \log y') = 0$ .

$y'' = 0$  のとき  $y = xp - p \log p + p + d$  が解になる。

$x = \log y'$  のとき  $y' = e^x$  代入して  $y = xe^x - e^x x + e^x + d = e^x + d$  が解になる。

□