

# A Primer to Ordinary Differential Equations

Yamagami Shigeru

平成 13 年 2 月 8 日

## 1 微分方程式とは

自然現象（とくに物理現象）の多くは、考察の対象としている量の微分を含んだ式で記述される。

- Newton の運動方程式

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F(x).$$

- (logistic equation)

$$\frac{dx}{dt} = (a - bx)x$$

( $a > 0$  は人口増加率、 $b > 0$  は人口抑制係数)

- 波動方程式

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0.$$

- 拡散方程式

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = c \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}.$$

- Schrödinger 方程式

$$i \frac{\partial \varphi}{\partial t} = - \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \varphi + V(x, y, z) \varphi.$$

以下、(i), (ii) の場合のように変数が 1 個の場合（変数は、しばしば時間の意味をもつので、 $t$  で表す）を扱う。それに対して、偏微分が関係してくる方程式をとくに、偏微分方程式と呼ぶ。

## 2 積分による解法

例題 2.1.

(i)  $\frac{dx}{dt} = f(t)$  のときは、解  $x(t)$  は  $f(t)$  の原始関数に他ならない。

(ii)  $\frac{dx}{dt} = f(x)$  のときは、変数変換  $t \mapsto x(t)$  による置換積分を考えると、

$$\int_{x_0}^x \frac{1}{f(x)} dx = \int_{t_0}^t dt = t - t_0$$

となるので、これを  $x$  について解けばよい ( $x$  を  $t$  で表す)。例えば、 $\frac{dx}{dt} = \lambda x$  ( $\lambda$  は実定数) のときは、

$$\int_{x_0}^x \frac{1}{x} dx = \int_0^t \lambda dt \implies \log x - \log x_0 = \lambda t$$

を解いて、 $x = x_0 e^{\lambda t}$  となる。 ( $\lambda < 0$  の時には、放射性物質の割合の変化を記述する。)

上の例でみたような、 $\frac{dx}{dt}$  の形の微分だけが現れる方程式は、 ( $\frac{dx}{dt}$  について解くことにより) 一般に、

$$\frac{dx}{dt} = f(t, x)$$

の形に書き直すことができる。

例題 2.2. 上の一般形で、 $f(t, x) = \varphi(t)\psi(x)$  と積の形に分解できるときは、上の (ii) の解法に倣って、

$$\int_{x_0}^x \frac{1}{\psi(x)} dx = \int_{t_0}^t \varphi(t) dt$$

を計算して、その結果を  $x$  について解けばよい。

例題 2.3. Logistic equation で、 $x$  の単位を適当にとると、 $b = 1$  と仮定してよい。このとき、

$$\int \frac{1}{(a-x)x} dx = \frac{1}{a} \int \left( \frac{1}{a-x} + \frac{1}{x} \right) dx = -\frac{1}{a} \log(a-x) + \frac{1}{a} \log x$$

であるから、

$$-\log(a-x) + \log x = at - C' \iff \frac{x}{a-x} = Ce^{at}$$

となって、

$$x = \frac{aCe^{at}}{1 + Ce^{at}}$$

が得られる。

問

- (i) 上で求めた解で、 $C$  を  $t=0$  での  $x$  の値  $c$  を使って表せ。
- (ii) 解の分母が 0 になることがあるかどうかで場合を分けて、解のグラフの概形を描け。解の「爆発」がおこるのはどのような時か。

### 3 ベクトル場と解曲線

関数  $x = x(t)$  の 2 階の微分を含んだ微分方程式の一般形は、

$$\frac{d^2x}{dt^2} = f\left(t, x, \frac{dx}{dt}\right)$$

である。この式で  $y = \frac{dx}{dt}$  とおくと、

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y \\ \frac{dy}{dt} = f(t, x, y) \end{cases}$$

と連立の形に書き直せる。より一般に、

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = g(t, x, y) \\ \frac{dy}{dt} = f(t, x, y) \end{cases}$$

という 2 個（未知関数も 2 個）の連立 1 階微分方程式は、1 個の 2 階微分方程式を特別な場合として含む。同様に、1 個の  $n$  階微分方程式は、 $n$  個の連立 1 階微分方程式はの形に書くことができる。そこで、以下、1 階の連立微分方程式を中心に調べることにしよう。

問 未知関数 1 個の 3 階微分方程式を、未知関数 3 個の連立方程式の形に書き直せ。

## 幾何学的解釈

上記の連立微分方程式を考える。  $t$  を時間のパラメータと思うと、関数の組み、  $f(t, x, y), f(t, x, y)$  は、時間  $t$  に依存したベクトル場

$$\vec{v}(t, x, y) = (g(t, x, y), f(t, x, y))$$

を表していると思うことができる。一方、連立微分方程式の解  $x(t), y(t)$  は、平面上の曲線

$$\vec{p}(t) = (x(t), y(t))$$

を表していると解釈すれば（この意味で解曲線と呼ぶ）、考えている微分方程式は、曲線  $\vec{p}(t)$  でその時刻  $t$  における接ベクトル  $\frac{d\vec{p}}{dt}$  が、点  $\vec{p}(t)$  におけるベクトル場  $\vec{v}(t, \vec{p}(t))$  の値に等しいもの、すなわち、連立微分方程式は

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{v}(t, \vec{p})$$

をみたく曲線  $\vec{p}(t)$  (ベクトル場の解曲線) を規定する方程式と解釈することができる。

例題 3.1. 与えられた実数  $\omega$  に対して、

$$\frac{dx}{dt} = \omega y, \quad \frac{dy}{dt} = -\omega x$$

は、同心円状のベクトル場

$$\vec{v}(x, y) = \omega(y, -x)$$

の解曲線に対する方程式である。

## 4 解の一意性

微分方程式の解に対して、与えられた時刻  $t_0$  で、点  $(x_0, y_0)$  を通るといふ形の条件を初期条件という。与えられた初期条件に対して、それを満たす解は、通常一つだけ決まる（解の一意性定理）。より正確には、

定理 4.1. ベクトル場、  $\vec{v}(t, x, y)$  が  $x, y$  について偏微分可能で、  $x, y$  について偏微分した結果が、  $(t, x, y)$  の連続関数であるならば、2つの解曲線  $(x(t), y(t)), (X(t), Y(t))$   $a < t < b$  があって、ある時刻  $s$  で一致していれば  $(x(s) = X(s), y(s) = Y(s))$  全ての時刻で一致する

$$(x(t), y(t)) = (X(t), Y(t)), \quad a < t < b.$$

証明を始める前に、ベクトル値関数の積分についての注意：

$$\vec{f}(t) = (f_1(t), \dots, f_n(t)) \in \mathbb{R}^n$$

なるベクトル値連続関数に対してその（リーマン）積分

$$\int_a^b \vec{f}(t) dt \in \mathbb{R}^n$$

が定義できて、

$$\int_a^b \vec{f}(t) dt \in \mathbb{R}^n = \left( \int_a^b f_1(t) dt, \dots, \int_a^b f_n(t) dt \right)$$

を満たす（これを定義とんでもいいのだが、そうすると次の不等式の証明で困ることになる）。さらに、不等式

$$\left\| \int_a^b \vec{f}(t) dt \right\| \leq \int_a^b \|\vec{f}(t)\| dt$$

も成り立つ。

補題 4.2 (Lipschitz' continuity). 記号の変更。

$$\begin{aligned} \vec{x} &= (x_1, \dots, x_n), \\ \vec{f}(t, \vec{x}) &= (f_1(t, \vec{x}), \dots, f_n(t, \vec{x})), \\ \vec{f}'(t, \vec{x}) &= \left( \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(t, \vec{x}) \right). \end{aligned}$$

定理の条件の元で、

$$\|\vec{f}(t, \vec{x}) - \vec{f}(t, \vec{y})\| \leq L \|\vec{x} - \vec{y}\|.$$

ここで、

$$L = \sup\{\|\vec{f}'(t, \vec{x})\|_{HS}; t, \vec{x}\}$$

*Proof.*

$$\frac{d}{ds} \vec{f}(t, \vec{x} + s(\vec{y} - \vec{x})) = \sum_j (y_j - x_j) \frac{\partial \vec{f}}{\partial x_j}(t, \vec{x} + s(\vec{y} - \vec{x}))$$

を積分すると、

$$\vec{f}(t, \vec{y}) - \vec{f}(t, \vec{x}) = \int_0^1 \sum_j (y_j - x_j) \frac{\partial \vec{f}}{\partial x_j}(t, \vec{x} + s(\vec{y} - \vec{x})) ds$$

となって、これから

$$\begin{aligned} \|\vec{f}(t, \vec{x}) - \vec{f}(t, \vec{y})\| &\leq \int_0^1 \sum_j |y_j - x_j| \left\| \frac{\partial \vec{f}}{\partial x_j}(t, \vec{x} + s(\vec{y} - \vec{x})) \right\| ds \\ &\leq \|\vec{y} - \vec{x}\| \int_0^1 \|\vec{f}'(t, \vec{x} + s(\vec{y} - \vec{x}))\|_{\text{HS}} ds. \end{aligned}$$

□

さて、2つの解  $\vec{x}(t)$ ,  $\vec{y}(t)$  が初期条件  $\vec{x}(0) = \vec{c} = \vec{y}(0)$  を満すとする、

$$\begin{aligned} \vec{x}(t) &= \vec{c} + \int_0^t \vec{f}(s, \vec{x}(s)) ds, \\ \vec{y}(t) &= \vec{c} + \int_0^t \vec{f}(s, \vec{y}(s)) ds \end{aligned}$$

であるので、差のノルムを計算すると、

$$\|\vec{x}(t) - \vec{y}(t)\| \leq \int_0^t \|\vec{f}(s, \vec{x}(s)) - \vec{f}(s, \vec{y}(s))\| ds \leq L \int_0^t \|\vec{x}(s) - \vec{y}(s)\| ds$$

となる。そこで、関数

$$F(t) = \|\vec{x}(t) - \vec{y}(t)\|$$

に次の補題を適用すれば、 $\vec{x}(t) = \vec{y}(t)$  が  $t = 0$  の近くで成り立つことがわかり、従って、すべての  $t$  で等しい。

補題 4.3. 連続関数  $F(t) \geq 0$  で、

$$F(t) \leq L \int_0^t F(s) ds$$

をみたすものがあれば、 $F(t) \equiv 0$  である。

*Proof.* 任意に与えられた正数  $\tau$  に対して、

$$M = \max\{F(t); 0 \leq t \leq \tau\}$$

とおくと、

$$F(t) \leq L \int_0^t F(s) ds \leq LMt, \quad 0 \leq t \leq \tau$$

である。これを再度、与えられた不等式に使うと

$$F(t) \leq L \int_0^t F(s) ds \leq L \int_0^t LM s ds = \frac{1}{2} L^2 M t^2.$$

以下、これを繰り返すと、

$$F(t) \leq \frac{1}{n!} L^n M t^n, \quad n \geq 1$$

が得られるので、極限  $n \rightarrow \infty$  を考えると、 $F(t) = 0$  であることが分かる。 □

べき級数

べき級数

$$\sum_{n \geq 0} c_n t^n$$

の収束半径は、

$$R = \frac{1}{\limsup_{n \rightarrow \infty} |c_n|^{1/n}}$$

で与えられ、べき級数は  $|t| \leq r < R$  の上で一様収束し、したがって連続関数

$$f(t) = \sum_{n \geq 0} c_n t^n, \quad |t| < R$$

を与える。

補題 4.4. 関数  $f(t)$  は、微分可能で、

$$f'(t) = \sum_{n \geq 1} n c_n t^{n-1}.$$

*Proof.* まず、べき級数

$$g(t) = \sum_{n \geq 1} n c_n t^{n-1}$$

の収束半径も  $R$  であることに注意する。とくに、関数  $g(t)$  は、 $|t| < R$  で連続。さらに、 $|t| \leq r < R$  で、

$$\begin{aligned} \left| \int_0^t (g(s) - \sum_{n=1}^N n c_n s^{n-1}) ds \right| &\leq \int_0^t \sum_{n \geq N+1} n |c_n| s^{n-1} ds \\ &\leq \int_0^t \sum_{n \geq N+1} n |c_n| r^{n-1} ds \\ &= \left( \sum_{n \geq N+1} n |c_n| r^{n-1} \right) |t| \rightarrow 0 \quad (N \rightarrow \infty) \end{aligned}$$

より、

$$\int_0^t g(s) ds = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N c_n t^n = \sum_{n \geq 1} c_n t^n$$

となつて、

$$f(t) = c_0 + \sum_{n \geq 1} c_n t^n = c_0 + \int_0^t g(s) ds$$

は微分可能かつ、

$$f'(t) = g(t) = \sum_{n \geq 1} n c_n t^{n-1}$$

がわかる。 □

命題 4.5. 与えられた実数  $\alpha$  に対して、

$$(1+t)^\alpha = \sum_{n \geq 0} \binom{\alpha}{n} t^n, \quad |t| < 1.$$

*Proof.* 関数  $f(t)$  を

$$f(t) = \sum_{n \geq 0} \binom{\alpha}{n} t^n$$

で定めると、

$$(n+1) \binom{\alpha}{n+1} + n \binom{\alpha}{n} = \alpha \binom{\alpha}{n}$$

より、

$$(1+t)f'(t) = \alpha f(t)$$

である。一方、関数  $(1+t)^\alpha$  もこの微分方程式の解であり、 $t=0$  での値は  $f(0)$  に一致する。従つて、解の一意性により、求める関係式を得る。 □



問 他の初等関数の Taylor 展開についても、微分方程式の解の一意性を使って証明してみよ。

例題 4.6 (三角関数の加法公式). 与えられた実数  $s$  に対して、2つの曲線

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(s+t) \\ \sin(s+t) \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos s \cos t - \sin s \sin t \\ \cos s \sin t + \sin s \cos t \end{pmatrix}$$

は、どちらも微分方程式

$$\begin{pmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -y \\ x \end{pmatrix}$$

の解で、初期条件  $(x(0), y(0)) = (\cos s, \sin s)$  をみたま。したがって、解の一意性により、一致する。これすなわち、三角関数の加法公式に他ならない。

問 指数法則  $e^{s+t} = e^s e^t$  を上の流儀で証明してみよ。

解の一意性が成り立たない例としては、当然 Lipschitz 連続性がくずれる関数  $f(x)$  を考えないといけないが、実際そのような例として

$$f(x) = \begin{cases} |x|^\alpha & \text{if } x \geq 0, \\ -|x|^\alpha & \text{if } x \leq 0 \end{cases}$$

$(0 < \alpha < 1)$  がある。この関数は原点で微分できない、のみならず、Lipschitz 連続性も原点で破綻する。この場合でも、変数分離法を適用して積分を計算すると、

$$t = \int_0^x x^{-\alpha} dx = \frac{1}{1-\alpha} x^{1-\alpha}$$

となって、これから

$$x(t) = (1-\alpha)^{1/(1-\alpha)} |t|^{1/(1-\alpha)}$$

という解の候補が得られる。これは、たしかに原点で微分可能で、微分方程式

$$\frac{dx}{dt} = f(x)$$

の解になっていて、 $x(0) = 0$  である。ところが、この初期条件を満たす解としては、 $x(t) \equiv 0$  もあるのであって、解の一意性は満たされない。

## 5 ベクトル場の第一積分

与えられた2次元ベクトル場、 $\vec{v}(x, y)$  に対して、関数  $F(x, y)$  で、どのような解曲線  $(x(t), y(t))$  を取ってきても、

$$F(x(t), y(t))$$

が  $t$  によらない、すなわち、

$$\frac{d}{dt}F(x(t), y(t)) = \frac{\partial F}{\partial x}(x(t), y(t))\frac{dx}{dt} + \frac{\partial F}{\partial y}(x(t), y(t))\frac{dy}{dt}$$

が成り立つようなものをベクトル場の(第一)積分とよぶ。 $(x(t), y(t))$  がベクトル場  $(f(x, y), g(x, y))$  の解曲線であることを使えば、上の条件は、

$$\frac{\partial F}{\partial x}(x, y)f(x, y) + \frac{\partial F}{\partial y}(x, y)g(x, y) = 0$$

と同値であるので、 $F(x, y)$  は、偏微分方程式

$$f(x, y)\frac{\partial F}{\partial x} + g(x, y)\frac{\partial F}{\partial y} = 0$$

の解である、ということもできる。

例題 5.1. ベクトル場が、関数  $H(x, y)$  を使って

$$\vec{v}(x, y) = \left( \frac{\partial H}{\partial y}(x, y), -\frac{\partial H}{\partial x}(x, y) \right)$$

と書けるならば(このようなベクトル場あるいは微分方程式をハミルトン系という)、 $H(x, y)$  はこのベクトル場の積分を与える。

振り子の運動方程式

振り子の振幅を角度  $x$  で表せば、適当な単位のもとで、その運動方程式は

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\sin x$$

となる。これを1階の方程式に書き直すと、

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= y, \\ \frac{dy}{dt} &= -\sin x. \end{aligned}$$

これは、ハミルトン系である。実際、

$$H(x, y) = \frac{1}{2}y^2 - \cos x$$

がハミルトン関数になっている（これは、系の力学的エネルギーを表している）。

さて、振り子の運動方程式の解  $(x(t), y(t))$  に対して、

$$H(x(t), y(t)) = c$$

は、 $t$  によらないので、解曲線  $(x(t), y(t))$  は、ハミルトン関数  $H$  の等高線上を移動する。そこで、 $H$  の等高線の様子は、振り子の解に対する重要な情報を与える。

また、上の関係式を  $y(t)$  について解けば、

$$\frac{dx}{dt} = \pm \sqrt{2(c + \cos x)}$$

なる 1 階の方程式が得られ、解の時間発展に関する具体的な情報を与える。

問  $c$  の値で場合分けして、 $H$  の等高線の様子を図示せよ。振り子の運動学的な様子についても併せて説明せよ。

Volterra の生存競争モデル

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \alpha x - \beta xy, \\ \frac{dy}{dt} &= -\gamma y + \delta xy, \\ \alpha, \beta, \gamma, \delta &> 0.\end{aligned}$$

$x, y$  は生物の個体数を表しているので、 $x > 0, y > 0$  の場合を考える。

問  $x' = ax, y' = by, t' = ct$  とスケールを変えることにより、

$$\beta = \gamma = \delta = 1$$

と取れることを示せ。

以下、簡単のために  $\alpha = \beta = \gamma = \delta = 1$  と仮定する。このとき、上の方程式は

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} \log x &= 1 - y, \\ \frac{d}{dt} \log y &= -1 + x\end{aligned}$$

と書き直すことができる。一方

$$\frac{d}{dt}(x+y) = x-y$$

であるから、これらの式から  $x-y$  を「消去」してやると、

$$\frac{d}{dt}(\log x + \log y - x - y) = 0$$

となって、関数  $\log x + \log y - xy$ 、あるいは、関数

$$F(x, y) = xye^{-x-y}$$

が系の積分を与える。

問

- (i) 関数  $F(x, y)$  の特異点を計算し、等高線の様子を調べよ。
- (ii)  $\alpha \neq 1$  のときに、第一積分を求めよ。

ここで関数の特異点について復習。ヘッセ行列 (Hessian) とその符号。変数変換の説明。特異点の分類と標準形。

微分方程式への応用として、ハミルトン系における周期解の存在。  $H(x, y) = x^3 - 3xy + y^3$  のとき。特異点は、 $(0, 0)$ ,  $(1, 1)$  で、 $(0, 0)$  は鞍点、 $(1, 1)$  は極小点。

## 6 ベクトル場の特異点と線型化

与えられたベクトル場  $(f(x, y), g(x, y))$  に対して、その特異点 (singular point) (あるいは不動点) を、

$$f(a, b) = g(a, b) = 0$$

となる点  $(a, b)$  であると定義する。

前節でみたようにハミルトン系の場合、ベクトル場は、

$$\left( \frac{\partial H}{\partial y}, -\frac{\partial H}{\partial x} \right)$$

で与えられ、この特異点とハミルトン関数  $H(x, y)$  の特異点は一致する。

ベクトル場が特異点  $(a, b)$  をもつとき、定数関数

$$(x(t), y(t)) = (a, b)$$

は微分方程式

$$\left( \frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt} \right) = (f(x, y), g(x, y))$$

の解である。逆に定数関数  $(x, y) = (a, b)$  が解であれば、点  $(a, b)$  はベクトル場  $(f(x, y), g(x, y))$  の特異点 (不動点) である。このような解を定常解 (stationary solution) ともいう。

ベクトル場の特異点  $(a, b)$  の付近での様子は、1 次の近似式

$$f(x, y) = f(a, b) + \frac{\partial f}{\partial x}(a, b)(x - a) + \frac{\partial f}{\partial y}(a, b)(y - b) + o(|x - a| + |y - b|)$$

$$g(x, y) = g(a, b) + \frac{\partial g}{\partial x}(a, b)(x - a) + \frac{\partial g}{\partial y}(a, b)(y - b) + o(|x - a| + |y - b|)$$

を使えば、よりやさしい方程式

$$\begin{pmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x - a \\ y - b \end{pmatrix}$$

が良い近似を与えるであろう。ここで、 $A$  は

$$A = \begin{pmatrix} f_x(a, b) & f_y(a, b) \\ g_x(a, b) & g_y(a, b) \end{pmatrix}$$

なる定数行列を表す。 $x, y$  の代りに、 $\xi = x - a, \eta = y - b$  を使えば、上の方程式は

$$\begin{pmatrix} \frac{d\xi}{dt} \\ \frac{d\eta}{dt} \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix}$$

となる。これをもとの微分方程式の特異点  $(a, b)$  における線型化 (linearization) と呼ぶ。

例題 6.1. 振り子の運動方程式の線型化は、単振動の方程式。2 種類の特異点を求める。

例題 6.2 (van del Pol 方程式).

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y \\ \frac{dy}{dt} = -x + a(1 - x^2)y \end{cases}, \quad a \text{ は実パラメータ.}$$

## 7 線型微分方程式

与えられた  $n \times n$  行列  $A$  に対して、(連立) 微分方程式

$$\dot{x} = Ax, \quad x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

を考える。これは著しい性質をもちかつ重要な方程式のクラスである。

命題 7.1. 線型微分方程式の解全体はベクトル空間を成す。解の重ね合せ。

$n = 1$  の時は、指数関数を表す微分方程式で、初期条件  $x(0) = x_0$  をみたす解は

$$x(t) = e^{At}x_0$$

で与えられる。

一般の  $n$  に対しても、行列の指数関数  $e^{At}$  を

$$e^{At} = I + tA + \frac{1}{2}t^2A^2 + \frac{1}{3!}t^3A^3 + \dots$$

で定義すれば、微分の関係式

$$\frac{d}{dt}e^{tA} = Ae^{tA}$$

をみたすので、初期条件  $x(t) = x_0$  の解はやはり、

$$x(t) = e^{tA}x_0$$

と書き表すことができる。この表示(考え)は理論的に非常に重要であるが、解の具体的な形を求めるためには、別の工夫が必要である。

固有値と固有ベクトル。行列  $A$  の固有ベクトル

$$Au = \lambda u$$

がみつければ、微分方程式の解を

$$x(t) = \varphi(t)u$$

の形のなかから探すことにより、初期条件  $x(0) = u$  をみたす解は

$$x(t) = e^{\lambda t} u$$

であることがわかる。これは、上の行列の指数関数による表示を使ってもすぐわかる。

一般に固有ベクトルが沢山（というか最大個数）あるときには、このようにして解の具体的な表示を得ることができる。

- (i) 固有ベクトルからなる基底  $\{u_1, \dots, u_n\}$  を取ってくる。
- (ii) 与えられた初期値ベクトル  $x_0$  を上で求めた固有ベクトルを使って、

$$x_0 = \xi_1 u_1 + \dots + \xi_n u_n$$

と表す。

- (iii) 微分方程式の初期条件  $x(t) = x_0$  をみたす解は

$$x(t) = e^{\lambda_1 t} \xi_1 u_1 + \dots + e^{\lambda_n t} \xi_n u_n$$

で与えられる。

例題 7.2.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

のとき、初期条件

$$x(0) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

を満たす解を求めよ。固有ベクトルを使う方法または  $e^{tA}$  を直接計算する。

問

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & a \end{pmatrix}$$

の場合を調べ、

$$x(0) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

となる解を具体的に求めよ。

ここで、微分方程式

$$\frac{dx}{dt} = Ax$$

で解

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix}$$

を複素数値関数の範囲で探すことの意義について説明。

例題 7.3. 与えられた複素数  $c = a + ib$  に対して、複素数値関数  $z(t)$  で、微分方程式

$$\frac{dz}{dt} = cz(t)$$

満たすものは、

$$z(t) = z(0)e^{ct} = z(0)e^{at}(\cos(bt) + i \sin(bt))$$

である。

これを使えば、固有値が実数でないときは、とりあえず、(成分が)複素数値関数の解を求め、必要に応じて、その「実数部分」として、実数値解を求める、という方針が得られる。

以下、 $A$  が 2 行 2 列の実行列とする。 $A$  の固有値の様子で、大きく次の 3 つの場合に類別される。

- 固有値が実数で、対角化できる場合。
- 固有値が複素数の場合。
- 固有値が実数で対角化できない場合。

ここで、対角化の判定条件を。

2 × 2 行列が対角化できる  $\iff$  固有値が 2 つあるかまたは対角行列。

基底と座標、座標変換と対角化について説明。

(i) 固有ベクトルを  $u, v$  で表して、

$$Au = \lambda u, Av = \mu v$$



とする。

(ii) 行列  $A$  の固有値が、 $\lambda, \bar{\lambda}$  であるとき、固有値  $\lambda = \alpha + i\beta$  の固有ベクトル  $u$  を取ってくれば、

$$Au = \lambda u, \quad A\bar{u} = \bar{\lambda}\bar{u}$$

となる。実行列による標準形は、

$$e = \frac{u + \bar{u}}{2}, \quad f = \frac{u - \bar{u}}{2i}$$

と表して  $u = e + if$  を使えば、

$$Ae = \alpha e - \beta f, \quad Af = \beta e + \alpha f$$

であるから、(座標変換) 行列を

$$Q = (e, f)$$

で定義すれば、

$$Q^{-1}AQ = \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ -\beta & \alpha \end{pmatrix}$$

となる。この新しい座標を使えば、

$$e^{tA} = Q^{-1}e^{tB}Q,$$

$$e^{tB} = e^{t\alpha} \begin{pmatrix} \cos(\beta t) & \sin(\beta t) \\ -\sin(\beta t) & \cos(\beta t) \end{pmatrix}$$

となって、解曲線は、螺旋状のものであることが分かる。

(iii) 行列  $A$  が対角化できない場合は、固有値  $\lambda$  は 1 個の実数で、その固有ベクトルを  $u$  とすれば、

$$e^{\lambda t}u$$

が一つの解。

ベクトル 1 個だけでは座標変換できないので、とりあえず  $u$  以外の方向のベクトル  $v$  をとってきて (これは、固有ベクトルではない！)

$$P = (u, v)$$

なる座標変換を考えると、

$$P^{-1}AP = \begin{pmatrix} \lambda & a \\ 0 & b \end{pmatrix}$$

ただし、 $Av = au + bv$ 。固有値は  $\lambda$  1 個なので、 $b = \lambda$  でなくてはならない。さらに  $a \neq 0$  なので（何故か？） $a^{-1}v$  を改めて  $v$  と書いて、 $a = 1$  としよ。以上により、座標変換により行列  $A$  は、

$$\begin{pmatrix} \lambda & 1 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}$$

に移される。

問 行列

$$\begin{pmatrix} \lambda & 1 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}$$

は対角化できない。これを示せ。

さて、微分方程式

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda & 1 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

を解くのに、まず、

$$x_2(t) = x_2(0)e^{\lambda t}$$

であり、これを最初の式に代入すると、

$$\frac{dx_1}{dt} = \lambda x_1 + x_2(0)e^{\lambda t}$$

となる。これを解くのに、 $x_2(0) = 0$  のときは、簡単で、

$$x_1(t) = x_1(0)e^{\lambda t}.$$

一般の  $x_2(0) \neq 0$  の場合の解を捜すために、この特別解の定数部分  $x_1(0)$  を  $t$  の関数に置き換えた、

$$x_1(t) = f(t)e^{\lambda t}$$

なるものが解にならないか考える(定数変化法)(the method of variation of constants)。これを、解くべき方程式に代入すると、

$$\frac{df}{dt} = x_2(0)$$

となるので、解は、

$$f(t) = x_1(0) + x_2(0)t$$

すなわち、

$$x_1(t) = (x_1(0) + x_2(0)t)e^{\lambda t}$$

であることがわかり、

$$\begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{\lambda t} & te^{\lambda t} \\ 0 & e^{\lambda t} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(0) \\ x_2(0) \end{pmatrix}$$

と書ける。これと、一般的な関係式

$$\begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix} = e^{tA} \begin{pmatrix} x_1(0) \\ x_2(0) \end{pmatrix}$$

とを比較すると、

$$e^{tA} = \begin{pmatrix} e^{\lambda t} & te^{\lambda t} \\ 0 & e^{\lambda t} \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} \lambda & 1 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}$$

なる公式が得られた。

これはまた、次のように直接計算することも可能である。 $A^2, A^3, \dots$ を順次計算していけば、

$$A^n = \begin{pmatrix} \lambda^n & n\lambda^{n-1} \\ 0 & \lambda^n \end{pmatrix}$$

がわかり、したがって、

$$e^{tA} = \sum_{n \geq 0} \frac{t^n}{n!} A^n = \begin{pmatrix} e^{\lambda t} & b \\ 0 & e^{\lambda t} \end{pmatrix}$$

ここで、

$$b = \sum_{n \geq 1} \frac{t^n}{n!} n\lambda^{n-1} = \frac{\partial}{\partial \lambda} \left( \sum_{n \geq 0} \frac{1}{n!} \lambda^n t^n \right) = \frac{\partial}{\partial \lambda} e^{\lambda t} = te^{\lambda t}.$$

以上の方程式の分類を幾何学的な意味でまとめると、つぎのようになる。

- (i) 行列  $A$  の固有値が正数（負数）で対角化できるとき、解曲線は原点から外側（内側）に放射状に伸びる。
- (ii) 行列  $A$  が正負ふたつの固有値をもつとき、解曲線は、双曲線で、二つの固有ベクトルが漸近線を与える。
- (iii) 行列  $A$  が複素数の固有値をもつとき、解曲線は原点を中心とした指数螺旋。
- (iv) これ以外の場合は、固有値に  $0$  を含むか、対角化できない場合。

与えられた微分方程式の線型化が最初の3つのいずれかの場合は、線型化された方程式の解曲線の様子が、そのままとの方程式の不動点ちかくでの様子を近似する。

同様の分類は、行列  $A$  のサイズが3以上でも（原理的に）可能であるが、格段に難しくなる。

上の計算でも使った定数変化法は、実用的にも役立つものなので、ここでもう少し詳しくみておこう。サイズ  $n$  の正方行列  $A$  と、ベクトル値関数

$$f(t) = \begin{pmatrix} f_1(t) \\ \vdots \\ f_n(t) \end{pmatrix}$$

を用意して、未知関数

$$x(t) = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{pmatrix}$$

に対する微分方程式

$$\frac{dx}{dt} = Ax(t) + f(t)$$

を考える。 $f(t) = 0$  のときには、行列  $A$  の指数関数  $e^{tA}$  を使って  $x(t) = e^{tA}x(0)$  と解くことができた。そこで、 $f \neq 0$  に、

$$x(t) = e^{tA}y(t)$$

なる形の解を捜してみると、

$$\frac{d}{dt} (e^{tA}y(t)) = Ae^{tA}y(t) + e^{tA} \frac{dy}{dt}$$

により、

$$\frac{dy}{dt} = e^{-tA} f(t)$$

に帰着するので、これを積分した

$$y(y) = x(0) + \int_0^t e^{-sA} f(s) ds$$

を代入して、

$$x(t) = e^{tA} x(0) + \int_0^t e^{(t-s)A} f(s) ds$$

なる解の表示を得る。

具体例として、行列

$$A = \begin{pmatrix} 0 & \alpha \\ -\alpha & 0 \end{pmatrix}$$

に対して、

$$f(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ b \sin \beta t \end{pmatrix}$$

を考えよう。以前の公式から、

$$e^{tA} = \begin{pmatrix} \cos \alpha t & \sin \alpha t \\ -\sin \alpha t & \cos \alpha t \end{pmatrix}$$

である。そこで、

$$e^{(t-s)A} f(s) = b \begin{pmatrix} \sin \alpha(t-s) \sin \beta s \\ \cos \alpha(t-s) \sin \beta s \end{pmatrix}$$

の積分が問題になる。三角関数の公式により、

$$\begin{aligned} \sin \alpha(t-s) \sin \beta s &= \frac{1}{2} \cos[\alpha(t-s) - \beta s] - \frac{1}{2} \cos[\alpha(t-s) + \beta s] \\ \cos \alpha(t-s) \sin \beta s &= \frac{1}{2} \sin[\alpha(t-s) - \beta s] + \frac{1}{2} \sin[\alpha(t-s) + \beta s] \end{aligned}$$

であるから、これを  $s$  変数について積分して、

$$\int_0^t e^{(t-s)A} f(s) ds = \frac{b}{\alpha^2 - \beta^2} \begin{pmatrix} \alpha \sin \beta t - \beta \sin \alpha t \\ \alpha(\cos \beta t - \sin \alpha t) \end{pmatrix}$$

となる ( $\alpha \neq \beta$ )。これは、 $\beta \rightarrow \alpha$  のとき、

$$\frac{b}{2} \begin{pmatrix} \frac{\sin \alpha t}{\alpha} - t \cos \alpha t \\ t \sin \alpha t \end{pmatrix}$$

に近づく。最後の式からわかるように、 $t \rightarrow \infty$  はいくらでも大きくなり発散する。共鳴 (resonance) 現象。

これはまた、複素数値関数  $z(t) = x(t) + iy(t)$  を使って次のようにも解くことができる。

$$\frac{dz}{dt} = -i\alpha z + \frac{b}{2}(e^{i\beta t} - e^{-i\beta t})$$

で

$$z(t) = w(t)e^{-i\alpha t}$$

とおくと、

$$\frac{dw}{dt} = \frac{b}{2}(e^{i(\alpha+\beta)t} - e^{i(\alpha-\beta)t})$$

となるので、これを解いて

$$w(t) = w(0) + \frac{b}{2i} \left( \frac{e^{i(\alpha+\beta)t} - 1}{\alpha + \beta} - \frac{e^{i(\alpha-\beta)t} - 1}{\alpha - \beta} \right)$$

したがって、

$$z(t) = z(0)e^{-i\alpha t} + \frac{b}{2i} \left( \frac{e^{i\beta t} - e^{-i\alpha t}}{\alpha + \beta} - \frac{e^{-i\beta t} - e^{-i\alpha t}}{\alpha - \beta} \right).$$

二体問題

ニュートンの重力理論によれば、二つの天体の運動は、

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} &= -\frac{\vec{x} - \vec{y}}{|\vec{x} - \vec{y}|^3}, \\ n \frac{d^2 \vec{y}}{dt^2} &= -\frac{\vec{y} - \vec{x}}{|\vec{x} - \vec{y}|^3} \end{aligned}$$

なる連立微分方程式で与えられる。

これを解いてみよう。符号に注意して、右辺の重力の項を消去すると、

$$\frac{d^2}{dt^2}(m \vec{x} + n \vec{y}) = 0$$

となつて、

$$m \vec{x} + n \vec{y} = t \vec{a} + \vec{b}$$

であることがわかる。これは、二体の重心  $m\vec{x} + n\vec{y}$  が等速度運動をするということで、この重心からの相対運動を問題にすれば、

$$m \frac{d^2}{dt^2} \left( \vec{x} - \frac{m\vec{x} + n\vec{y}}{m+n} \right) = \frac{mn}{m+n} \frac{d^2}{dt^2} (\vec{x} - \vec{y})$$

から、 $\vec{f} = \vec{x} - \vec{y}$ ,  $\mu = mn/(m+n)$  とおくと、

$$\mu \frac{d^2 \vec{f}}{dt^2} = -\frac{\vec{f}}{|\vec{f}|^3}$$

となる。

ここで、ベクトル積

$$\vec{f} \times \frac{d\vec{f}}{dt}$$

を考えると、これは、運動の定数（微分方程式の積分）である。そこで、座標系を  $f_3$ -軸がこの方向であるようにとると、運動は、 $f_3 = 0$  なる平面に限定される。そこで、ベクトル値関数  $\vec{f}(t)$  の代りに、複素数値関数

$$z(t) = f_1(t) + if_2(t)$$

を導入すれば、上の方程式は、

$$\mu \frac{d^2 z}{dt^2} = -\frac{z}{|z|^3}$$

という形になる。さらに極座標  $z = re^{i\theta}$  を使えば ( $r = r(t)$ ,  $\theta = \theta(t)$  は  $t$  の関数)

$$\begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= \frac{dr}{dt} e^{i\theta} + ir \frac{d\theta}{dt} e^{i\theta}, \\ \frac{d^2 z}{dt^2} &= \frac{d^2 r}{dt^2} e^{i\theta} + 2i \frac{dr}{dt} \frac{d\theta}{dt} e^{i\theta} + ir \frac{d^2 \theta}{dt^2} e^{i\theta} - r \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 e^{i\theta} \end{aligned}$$

であるから、両辺を比較して、

$$\begin{aligned} \frac{d^2 r}{dt^2} - r \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 &= -\frac{\mu r^2}{r^3}, \\ \frac{d}{dt} \left( r^2 \frac{d\theta}{dt} \right) &= 2r \frac{dr}{dt} \frac{d\theta}{dt} + r^2 \frac{d^2 \theta}{dt^2} = 0 \quad (\text{Kepler の第二法則}). \end{aligned}$$

この二つ目の式から、

$$r^2 \frac{d\theta}{dt} = a$$

は運動の定数であり、これを使って、角速度を消すと、

$$\frac{d^2 r}{dt^2} - \frac{a^2}{r^3} + \frac{1}{\mu r^2} = 0$$

なる  $r$  についての微分方程式が得られる。

これそのものは、簡単な関数では表せないが、 $r = r(t)$  と  $\theta = \theta(t)$  から、 $t$  を消去した、軌道の方程式  $r = \rho(\theta)$  は次の様にして求めることができる。 $\rho(\theta)$  に対する方程式は、

ここで、一工夫。 $r$  のかわりにその逆数  $s = \rho(\theta)^{-1}$  を考えると、

この等速度運動をしている座標系を導入すれば、 $m\vec{x} + n\vec{y} = 0$  と仮定して一般性を失わない。

この仮定の下で、