

実対称行列

数理工学 第6回

小林 健 / Ken Kobayashi

東京科学大 工学院 経営工学系

2025年10月23日

目次

- ① 実対称行列の固有値・固有ベクトル
- ② 実対称行列の対角化
- ③ 正方行列の三角化

目次

① 実対称行列の固有値・固有ベクトル

② 実対称行列の対角化

③ 正方行列の三角化

複素ベクトル・複素行列に関する表記

今回は複素数を成分にもつベクトル・行列が登場する:

- \mathbb{C} 複素数全体の集合
- \mathbb{C}^n 複素数を成分にもつ n 次元ベクトル全体の集合
- $\mathbb{C}^{m \times n}$ 複素数を成分にもつ $m \times n$ 行列全体の集合
- ベクトル $\boldsymbol{v} \in \mathbb{C}^n$, 行列 $A \in \mathbb{C}^{m \times n}$ の各成分を共役複素数に置き換えたベクトル, 行列をそれぞれ $\bar{\boldsymbol{v}}, \bar{A}$ と表す.

例

$$\boldsymbol{v} = \begin{pmatrix} 1 + 2i \\ 3 - 4i \\ -i \end{pmatrix} \in \mathbb{C}^3, \quad \bar{\boldsymbol{v}} = \begin{pmatrix} 1 - 2i \\ 3 + 4i \\ i \end{pmatrix} \in \mathbb{C}^3$$
$$A = \begin{pmatrix} 1 & i \\ 2 - i & 3 \end{pmatrix} \in \mathbb{C}^{2 \times 2}, \quad \bar{A} = \begin{pmatrix} 1 & -i \\ 2 + i & 3 \end{pmatrix} \in \mathbb{C}^{2 \times 2}$$

実対称行列の固有値は実数

- 一般の正方行列では、固有値が実数であるとは限らない。
- しかし行列を**実対称行列**に限定すると、固有値は必ず実数になる。

定理 (実対称行列の固有値は実数)

n 次正方行列 A が実対称行列のとき、 A の固有値はすべて実数である。

↪ 固有ベクトルも実ベクトル

証明 固有値とその共役複素数が一致することを示す。

- A の固有値を $\lambda \in \mathbb{C}$ とし、対応する固有ベクトルを $v \in \mathbb{C}^n$ とする。このとき

$$(\lambda I - A)v = 0.$$

- λ の共役複素数を $\bar{\lambda}$ として

$$w := (\bar{\lambda}I - A)v \tag{1}$$

とおく。

- w の各成分を共役複素数に置き換えたベクトルを \bar{w} とすると,
 A が実対称行列であること ($\bar{A} = A, A^T = A$) より,

$$\bar{w}^T = \overline{((\bar{\lambda}I - A)v)^T} = \bar{v}^T(\lambda I - A)^T = \bar{v}^T(\lambda I - A).$$

- よって

$$\bar{w}^T w = \bar{v}^T(\lambda I - A)(\bar{\lambda}I - A)v \stackrel{(*)}{=} \bar{v}^T(\bar{\lambda}I - A)(\lambda I - A)v = 0$$

であり, $w = 0$ である.

- したがって式 (1) より $(\bar{\lambda}I - A)v = 0$ であり, v は固有値 $\bar{\lambda}$ に対応する固有ベクトル.
- よって $\lambda = \bar{\lambda}$ であり, 固有値 λ は実数. □

(*) の式変形は

$$(\lambda I - A)(\bar{\lambda}I - A) = \lambda\bar{\lambda}I - \lambda A - \bar{\lambda}A + A^2 = (\bar{\lambda}I - A)(\lambda I - A)$$

であることに基づく. 一般の行列積は必ずしも可換ではないので注意せよ.

実対称行列の性質

定理 (実対称行列の固有ベクトルの直交性)

n 次実対称行列 A の異なる固有値に対応する固有ベクトルは直交する。

証明

- A の異なる固有値を α, β ($\alpha \neq \beta$), それぞれに対応する固有ベクトルを \mathbf{x}, \mathbf{y} とする。
- $\mathbf{x}^T \mathbf{y} = C$ とする。このとき,

$$(A\mathbf{x})^T \mathbf{y} = (\alpha\mathbf{x})^T \mathbf{y} = \alpha C,$$

$$(A\mathbf{x})^T \mathbf{y} = \mathbf{x}^T (A^T \mathbf{y}) = \mathbf{x}^T (A\mathbf{y}) = \mathbf{x}^T (\beta\mathbf{y}) = \beta C.$$

- よって $\alpha C = \beta C$ であり, $\alpha \neq \beta$ から $C = 0$.
- したがって $\mathbf{x}^T \mathbf{y} = 0$ であり, \mathbf{x} と \mathbf{y} は直交する。 □

目次

① 実対称行列の固有値・固有ベクトル

② 実対称行列の対角化

③ 正方行列の三角化

実対称行列の対角化可能性

定理 (実対称行列の対角化)

任意の n 次実対称行列 A に対し, ある直交行列 P が存在して $P^T A P$ が対角行列になる.

証明 n に関する帰納法で示す.

- 任意の $n - 1$ 次実対称行列が直交行列で対角化可能と仮定し, 任意の n 次実対称行列が直交行列で対角化可能であることを示す.
- A の固有値の一つを $\lambda_1 \in \mathbb{R}$, 対応するノルムが 1 の固有ベクトルを $\mathbf{p}_1 \in \mathbb{R}^n$ とする.
- \mathbf{p}_1 を含む \mathbb{R}^n の正規直交基底 $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_n$ を構成し, 直交行列 P_0 を次のように定義:

$$P_0 = (\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_n).$$

- $P_0^T A P_0$ を計算すると, (次のスライドへ)

$$P_0^T A P_0 = \begin{pmatrix} \mathbf{p}_1^T \\ \mathbf{p}_2^T \\ \vdots \\ \mathbf{p}_n^T \end{pmatrix} (A\mathbf{p}_1, A\mathbf{p}_2, \dots, A\mathbf{p}_n) = \begin{pmatrix} \mathbf{p}_1^T A\mathbf{p}_1 & \mathbf{p}_1^T A\mathbf{p}_2 & \cdots & \mathbf{p}_1^T A\mathbf{p}_n \\ \mathbf{p}_2^T A\mathbf{p}_1 & \mathbf{p}_2^T A\mathbf{p}_2 & \cdots & \mathbf{p}_2^T A\mathbf{p}_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{p}_n^T A\mathbf{p}_1 & \mathbf{p}_n^T A\mathbf{p}_2 & \cdots & \mathbf{p}_n^T A\mathbf{p}_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

- ここで、1 列目に注目すると

$$\begin{pmatrix} \mathbf{p}_1^T A\mathbf{p}_1 \\ \mathbf{p}_2^T A\mathbf{p}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{p}_n^T A\mathbf{p}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 \mathbf{p}_1^T \mathbf{p}_1 \\ \lambda_1 \mathbf{p}_2^T \mathbf{p}_1 \\ \vdots \\ \lambda_1 \mathbf{p}_n^T \mathbf{p}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\because \mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_n \text{ は正規直交基底}).$$

- また $P_0^T A P_0$ が対称行列であることから式 (2) は次のように書き直せる:

$$P_0^T A P_0 = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & & & \\ \vdots & & A_1 & \\ 0 & & & \end{pmatrix} \quad (\text{ただし, } A_1 \text{ は } (n-1) \text{ 次実対称行列}). \quad (3)$$

- 帰納法の仮定から A_1 は直交行列 P_1 を用いて $P_1^T A_1 P_1 = D$ と対角化可能.

(D : 対角行列)

- よって式 (3) に次の行列

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & & & \\ \vdots & & P_1^T & \\ 0 & & & \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & & & \\ \vdots & & P_1 & \\ 0 & & & \end{pmatrix}$$

をそれぞれ左, 右から掛けると,

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & & & \\ \vdots & & P_1^T & \\ 0 & & & \end{pmatrix} P_0^T A P_0 \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & & & \\ \vdots & & P_1 & \\ 0 & & & \end{pmatrix}}_{=: P \text{ とおく}} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & & & \\ \vdots & & P_1^T A_1 P_1 & \\ 0 & & & \end{pmatrix}$$

であり, A は行列 P を用いて対角化可能であることが示される.

- 最後に P が直交行列であることを示す。 $P^T P$ を計算すると

$$P^T P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & & & \\ \vdots & P_1^T & & \\ 0 & & & \end{pmatrix} P_0^T P_0 \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & & & \\ \vdots & P_1 & & \\ 0 & & & \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & & & \\ \vdots & P_1^T P_1 & & \\ 0 & & & \end{pmatrix} = I$$

であり P は直交行列。

- よって帰納法の仮定のもと、 A は直交行列で対角化可能であることが示される。 □

直交行列と固有ベクトル

実対称行列の場合，対角化で用いる直交行列の列ベクトルは固有ベクトルに対応する．

系 (対角化で用いる直交行列と固有ベクトルの関係)

n 次実対称行列 A を対角化する直交行列 P に対して， $P = (\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_n)$ と表すと， $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_n$ はそれぞれ A の固有ベクトルである．

目次

① 実対称行列の固有値・固有ベクトル

② 実対称行列の対角化

③ 正方行列の三角化

三角行列

対角成分より下の成分がすべてゼロの行列を上三角行列 (upper triangular matrix) という。

$$U = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & \cdots & u_{1n} \\ 0 & u_{22} & u_{23} & \cdots & u_{2n} \\ 0 & 0 & u_{33} & \cdots & u_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & u_{nn} \end{pmatrix}$$

三角行列の性質 三角行列は対角行列と同様のよい性質をもつ:

- 三角行列 U の固有値は対角成分 $u_{11}, u_{22}, \dots, u_{nn}$ と等しい.
- 三角行列の積は三角行列であり, U^k の対角成分は $u_{11}^k, u_{22}^k, \dots, u_{nn}^k$ である.

↪ 対角化可能性の議論を三角化に拡張する

ユニタリ行列: 直交行列の複素数版

複素行列で考えると、実対称行列の対角化可能性は「三角化可能性」として一般化できる

定義 (ユニタリ行列)

複素正方行列 U が $\bar{U}^T U = I$ を満たすとき, U を **ユニタリ行列 (unitary matrix)** という.

↪ 任意の直交行列 $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$ はユニタリ行列

ユニタリ行列の性質 ユニタリ行列は直交行列と同様の性質を持つ:

$U, V \in \mathbb{C}^{n \times n}$ をユニタリ行列とすると, 次が成立:

- U の列ベクトルは \mathbb{C}^n の正規直交基底をなす
- U は正則で, $U^{-1} = \bar{U}^T$
- UV もユニタリ行列

補足: \bar{U}^T を U の随伴行列という

行列の三角化可能性

定理 (正方行列の三角化可能性)

任意の正方行列 A に対して、あるユニタリ行列 U が存在して $\bar{U}^T A U$ が上三角行列になる。

証明 対角化の場合と同様に、 n に関する帰納法で示す。

- 任意の $n - 1$ 次正方行列がユニタリ行列で三角化可能と仮定し、任意の n 次正方行列がユニタリ行列で三角化可能であることを示す。
- $A \in \mathbb{C}^{n \times n}$ に対して、その固有値の一つを $\lambda_1 \in \mathbb{C}$ 、対応するノルムが 1 の固有ベクトルを $\mathbf{u}_1 \in \mathbb{C}^n$ とする。
- \mathbf{u}_1 を含む \mathbb{C}^n の正規直交基底 $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_n$ を構成し、ユニタリ行列 U_0 を次のように定義する:

$$U_0 = (\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_n).$$

- このとき,

$$\overline{U}_0^T A U_0 = \begin{pmatrix} \overline{\mathbf{u}}_1^T A \mathbf{u}_1 & \overline{\mathbf{u}}_1^T A \mathbf{u}_2 & \cdots & \overline{\mathbf{u}}_1^T A \mathbf{u}_n \\ \overline{\mathbf{u}}_2^T A \mathbf{u}_1 & \overline{\mathbf{u}}_2^T A \mathbf{u}_2 & \cdots & \overline{\mathbf{u}}_2^T A \mathbf{u}_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \overline{\mathbf{u}}_n^T A \mathbf{u}_1 & \overline{\mathbf{u}}_n^T A \mathbf{u}_2 & \cdots & \overline{\mathbf{u}}_n^T A \mathbf{u}_n \end{pmatrix} \quad (4)$$

- 式 (4) の 1 列目に注目すると,

$$\begin{pmatrix} \overline{\mathbf{u}}_1^T A \mathbf{u}_1 \\ \overline{\mathbf{u}}_2^T A \mathbf{u}_1 \\ \vdots \\ \overline{\mathbf{u}}_n^T A \mathbf{u}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 \overline{\mathbf{u}}_1^T \mathbf{u}_1 \\ \lambda_1 \overline{\mathbf{u}}_2^T \mathbf{u}_1 \\ \vdots \\ \lambda_1 \overline{\mathbf{u}}_n^T \mathbf{u}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\because \overline{U}_0^T U_0 = I).$$

- よって, A_{n-1} を $(n-1)$ 次正方行列として, 式 (4) は次のように書ける:

$$\overline{U_0}^T A U_0 = \begin{pmatrix} \lambda_1 & * & \cdots & * \\ 0 & & & \\ \vdots & & A_1 & \\ 0 & & & \end{pmatrix} \quad (5)$$

- 帰納法の仮定から, A_1 はユニタリ行列 U_1 を用いて $\overline{U_1}^T A_1 U_1$ と三角化可能.
- 式 (5) の両辺に次の行列

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & & & \\ \vdots & & \overline{U_1}^T & \\ 0 & & & \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & & & \\ \vdots & & U_1 & \\ 0 & & & \end{pmatrix}$$

をそれぞれ左, 右から掛けると, (次のスライドへ)

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & & & \\ \vdots & \bar{U}_1^T & & \\ 0 & & & \end{pmatrix} \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & & & \\ \vdots & & U_1 & \\ 0 & & & \end{pmatrix}}_{=:U\text{とおく}} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & * & \cdots & * \\ 0 & & & \\ \vdots & & \bar{U}_1^T A_1 U_1 & \\ 0 & & & \end{pmatrix}$$

となり、これは上三角行列である。よって A は行列 U で三角化可能である。

- $\bar{U}^T U = I$ より U はユニタリ行列なので、
最終的に A はユニタリ行列で三角化可能であることが示される。 □

教科書に関する補足

⚠ 教科書における三角化に関する命題 (定理 20.5, p.106) について

- 「任意の実正方行列 A は**直交行列で... 三角行列に変換できる**」と述べられているが、この主張は偽。任意の直交行列で三角化できない実正方行列が存在する。

直交行列で三角化できない実正方行列の例

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

- 任意の正方行列の三角化可能性を示すためには、**ユニタリ行列**を用いることが必要

対角化・三角化のまとめ

n 次正方行列を A とする.

- A はユニタリ行列で三角化可能
- A が実対称行列 $\implies A$ は直交行列で対角化可能
- A の固有値がすべて異なる
 $\implies A$ が n 個の線形独立な固有ベクトルをもつ $\iff A$ は対角化可能

三角化の応用: フロベニウスの定理

- 実数 $a_0, a_1, \dots, a_r \in \mathbb{R}$ を係数とする実数係数多項式

$$f(x) = a_r x^r + a_{r-1} x^{r-1} + \dots + a_1 x + a_0$$

に対して, 変数をスカラー x から正方行列 X に置き換えた関数を次のように定義する:

$$f(X) = a_r X^r + a_{r-1} X^{r-1} + \dots + a_1 X + a_0 I.$$

定理 (フロベニウスの定理)

n 次正方行列 A の固有値を $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ とする. このとき $f(A)$ の固有値は $f(\lambda_1), f(\lambda_2), \dots, f(\lambda_n)$ である.

- $f(A)$ を具体的に構成せずに, $f(A)$ の固有値が求まる.

証明

A はユニタリ行列 P を用いて次のように三角化できる:

$$P^{-1}AP = \begin{pmatrix} \lambda_1 & * & \cdots & * \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & * \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_n \end{pmatrix} (= T \text{ とおく}).$$

- このとき, 任意の自然数 k と実数 c に対して

$$\begin{aligned} P^{-1}(cA^k)P &= cP^{-1}A^kP = cP^{-1}\overbrace{AAA\cdots AA}^{k\text{個}}P \\ &= cP^{-1}A(\underbrace{PP^{-1}})A(\underbrace{PP^{-1}})A(\underbrace{PP^{-1}})\cdots(\underbrace{PP^{-1}})A(\underbrace{PP^{-1}})AP \\ &= c(P^{-1}AP)^k = cT^k = \begin{pmatrix} c\lambda_1^k & * & \cdots & * \\ 0 & c\lambda_2^k & \cdots & * \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & c\lambda_n^k \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

- したがって cA^k は P を用いて三角行列 cT^k に三角化できる.
- よって

$$\begin{aligned}
 P^{-1}f(A)P &= P^{-1}(a_r A^r + a_{r-1} A^{r-1} + \cdots + a_1 A + a_0 I)P \\
 &= P^{-1}(a_r A^r)P + P^{-1}(a_{r-1} A^{r-1})P + \cdots + P^{-1}(a_1 A)P + P^{-1}(a_0 I)P \\
 &= a_r T^r + a_{r-1} T^{r-1} + \cdots + a_1 T + a_0 I \\
 &= f(T) \\
 &= \begin{pmatrix} f(\lambda_1) & * & \cdots & * \\ 0 & f(\lambda_2) & \cdots & * \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & f(\lambda_n) \end{pmatrix}.
 \end{aligned}$$

- よって $P^{-1}f(A)P$ の固有値は $f(\lambda_1), f(\lambda_2), \dots, f(\lambda_n)$ であり, これらは $f(A)$ の固有値である. □

ケイリー・ハミルトンの定理

多項式 $f(x)$ を固有多項式とすると、次の命題が成立する。

定理 (ケイリー・ハミルトンの定理)

正方行列 A の固有多項式を $f_A(x)$ と表す。任意の n 次正方行列 A に対して、次が成立:

$$f_A(A) = O.$$

例 2 次正方行列 $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$ の固有多項式は

$$f_A(x) = \det(xI - A) = \begin{vmatrix} x - a_{11} & -a_{12} \\ -a_{21} & x - a_{22} \end{vmatrix} = x^2 - (a_{11} + a_{22})x + (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}).$$

よって、ケイリー・ハミルトンの定理から

$$f_A(A) = A^2 - (a_{11} + a_{22})A + (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})I = O$$

が成り立つ。

まとめ

講義の振り返り

- 実対称行列の固有値・固有ベクトル
- 実対称行列の対角化, (複素) 正方行列の三角化
- フロベニウスの定理とケイリー・ハミルトンの定理

自宅での復習

- 実対称行列の固有値が実数である証明の流れを確認する.
- 実対称行列の対角化可能性に関する証明の流れを確認する.
- フロベニウスの定理とケイリー・ハミルトンの定理の主張を復習する.