

# 第 24 回 回帰分析 (3.4, 13.1–13.2.1)

村澤 康友

2026 年 1 月 6 日

## 今日のポイント

1.  $E(Y|X)$  を与える式を,  $Y$  の  $X$  上への回帰モデルという. 線形な回帰モデルを線形回帰モデルという. 線形回帰モデルの説明変数の係数を回帰係数という.
2.  $Y$  の  $X$  上への線形回帰モデルにおける回帰係数は  $X$  から  $Y$  への限界効果を表す.  $\ln Y$  の  $\ln X$  上への線形回帰モデルにおける回帰係数は  $X$  に対する  $Y$  の弾力性を表す.
3. 残差 2 乗和を最小にするように回帰係数を定める方法を通常  $2$  乗法 (OLS) という. OLS 問題の  $1$  階の条件を整理した式を正規方程式という. OLS 問題の解を回帰係数の OLS 推定量 (値) という.

## 目次

1	回帰モデル	1
1.1	回帰 (p. 258)	1
1.2	回帰モデル (p. 258)	1
1.3	線形回帰モデル (p. 258)	1
1.4	単回帰と重回帰 (p. 270)	2
2	限界効果と弾力性	2
2.1	限界効果	2
2.2	弾力性 (p. 259, p. 277)	2
3	最小 2 乗法	3
3.1	定数項なしの単回帰モデル	3
3.2	定数項ありの単回帰モデル (p. 260)	3

4	今日のキーワード	4
5	次回までの準備	4

## 1 回帰モデル

### 1.1 回帰 (p. 258)

( $X, Y$ ) を確率ベクトルとする.  $X$  から  $Y$  を予測したい (身長→体重, 所得→消費など).

**定義 1.**  $E(Y|X)$  を求めることを,  $Y$  を  $X$  に回帰するという.

注 1.  $X$  がカテゴリ変数ならカテゴリごとの平均を求めるだけ.

注 2.  $F_{Y|X}(\cdot|\cdot)$  が求まれば理想的.

### 1.2 回帰モデル (p. 258)

**定義 2.**  $E(Y|X)$  を与える式を,  $Y$  の  $X$  上への回帰モデル (回帰式, 回帰関数) という.

注 3. すなわち

$$E(Y|X) = r(X)$$

**定義 3.** 説明する方の変数を説明変数という.

**定義 4.** 説明される方の変数を被説明変数という.

**定義 5.**  $U := Y - E(Y|X)$  を回帰の誤差項という.

注 4. 誤差項を用いて回帰モデルを表すと

$$Y = r(X) + U$$
$$E(U|X) = 0$$

### 1.3 線形回帰モデル (p. 258)

**定義 6.** 線形な回帰モデルを線形回帰モデルという.

注 5. すなわち

$$E(Y|X) = \alpha + \beta X$$

注 6.  $X, Y > 0$  なら  $\ln Y$  の  $\ln X$  上への線形回帰モデルを考えることも多い. すなわち

$$E(\ln Y | \ln X) = \alpha + \beta \ln X$$

**定義 7.** 線形回帰モデルの説明変数の係数を**回帰係数**という.

**定理 1.**  $(X, Y)' \sim N(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$  とする. ただし

$$\boldsymbol{\mu} := \begin{pmatrix} \mu_X \\ \mu_Y \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\Sigma} := \begin{bmatrix} \sigma_X^2 & \sigma_{XY} \\ \sigma_{YX} & \sigma_Y^2 \end{bmatrix}$$

このとき

$$Y|X \sim N(\mu_{Y|X}, \sigma_{Y|X}^2)$$

ただし

$$\begin{aligned} \mu_{Y|X} &:= \mu_Y + \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X^2}(X - \mu_X) \\ \sigma_{Y|X}^2 &:= \sigma_Y^2 - \frac{\sigma_{XY}^2}{\sigma_X^2} \end{aligned}$$

証明. 同時 pdf を周辺 pdf で割って条件付き pdf を求める. 詳細は略.  $\square$

注 7.  $E(Y|X)$  は  $X$  の 1 次式.  $\text{var}(Y|X)$  は  $X$  に依存しない.

#### 1.4 単回帰と重回帰 (p. 270)

**定義 8.** 定数項以外に説明変数が 1 つしかない線形回帰モデルを**単回帰モデル**という.

**定義 9.** 定数項以外に説明変数が複数ある線形回帰モデルを**重回帰モデル**という.

注 8. すなわち

$$E(Y|X_1, \dots, X_k) = \alpha + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_k X_k$$

**定義 10.** 重回帰モデルの回帰係数を**偏回帰係数**という.

## 2 限界効果と弾力性

### 2.1 限界効果

**定義 11.**  $X$  の 1 単位の増加に対する  $Y$  の変化を  $X$  から  $Y$  への**限界効果**という.

**定理 2.**  $Y$  の  $X$  上への線形回帰モデルにおける回帰係数は  $X$  から  $Y$  への限界効果を表す.

証明.  $Y$  の  $X$  上への線形回帰モデルは

$$\begin{aligned} Y &= \alpha + \beta X + U \\ E(U|X) &= 0 \end{aligned}$$

$X$  が 1 単位増えると  $Y$  は  $\beta$  単位増える ( $X$  が連続なら微分する).  $\square$

### 2.2 弾力性 (p. 259, p. 277)

**定義 12.**  $X$  の 1 % の増加に対する  $Y$  の変化率を  $X$  に対する  $Y$  の**弾力性**という.

注 9. 式で表すと

$$\epsilon := \frac{dY/Y}{dX/X} \approx \frac{\Delta Y/Y}{\Delta X/X}$$

**定理 3.**  $\ln Y$  の  $\ln X$  上への線形回帰モデルにおける回帰係数は  $X$  に対する  $Y$  の弾力性を表す.

証明.  $\ln Y$  の  $\ln X$  上への線形回帰モデルは

$$\begin{aligned} \ln Y &= \alpha + \beta \ln X + U \\ E(U|\ln X) &= 0 \end{aligned}$$

したがって

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{d \ln Y}{d \ln X} \\ &= \frac{dX}{d \ln X} \frac{dY}{dX} \frac{d \ln Y}{dY} \\ &= \left( \frac{d \ln X}{dX} \right)^{-1} \frac{dY}{dX} \frac{d \ln Y}{dY} \\ &= \left( \frac{1}{X} \right)^{-1} \frac{dY}{dX} \frac{1}{Y} \\ &= \frac{dY/Y}{dX/X} \end{aligned}$$

$\square$

### 3 最小 2 乗法

#### 3.1 定数項なしの単回帰モデル

2 変量データを  $((y_1, x_1), \dots, (y_n, x_n))$  とする.  
 $y_i$  の  $x_i$  上への定数項なしの単回帰モデルは

$$E(y_i|x_i) = \beta x_i$$

$\beta$  を求めたい (図 1 左).

**定義 13.** 実際の  $y_i$  と適当な回帰係数を用いた  $y_i$  の予測値との差を  $y_i$  の**残差**という.

注 10.  $\beta = b$  としたら  $y_i$  の残差は

$$e_i := y_i - bx_i$$

誤差  $u_i := y_i - \beta x_i$  とは異なる.

**定義 14.** 残差 2 乗和を最小にするように回帰係数を定める方法を**通常の最小 2 乗法** (*Ordinary Least Squares, OLS*) という.

注 11. すなわち OLS 問題は

$$\min_b \sum_{i=1}^n (y_i - bx_i)^2$$

and  $b \in \mathbb{R}$

ただし  $\mathbb{R}$  は実数の集合.

**定義 15.** OLS 問題の 1 階の条件を整理した式を**正規方程式**という.

注 12. 残差 2 乗和は  $b$  に関する凸関数なので, 1 階の条件は最小化の必要十分条件.

注 13. OLS 問題の 1 階の条件は

$$\sum_{i=1}^n (-x_i) 2(y_i - b^* x_i) = 0$$

すなわち

$$\sum_{i=1}^n x_i (y_i - b^* x_i) = 0$$

正規方程式は

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i - b^* \sum_{i=1}^n x_i^2 = 0$$

**定義 16.** OLS 問題の解を回帰係数の **OLS 推定量 (値)** という.

注 14. 正規方程式より  $\sum_{i=1}^n x_i^2 \neq 0$  なら  $\beta$  の OLS 推定値は

$$b^* = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2}$$

$\sum_{i=1}^n x_i^2 = 0$  だと解は存在しない.

**定義 17.** 回帰係数の OLS 推定量 (値) を用いた予測を**回帰予測**という.

注 15.  $y_i$  の回帰予測は  $\hat{y}_i := b^* x_i$ .

**定義 18.** 実際の値と回帰予測との差を**回帰残差**という.

注 16.  $y_i$  の回帰残差は  $e_i^* := y_i - \hat{y}_i$ .

#### 3.2 定数項ありの単回帰モデル (p. 260)

$y_i$  の  $x_i$  上への定数項ありの単回帰モデルは

$$E(y_i|x_i) = \alpha + \beta x_i$$

$(\alpha, \beta)$  を求めたい (図 1 右).  $(\alpha, \beta) = (a, b)$  としたら  $y_i$  の残差は

$$e_i := y_i - a - bx_i$$

OLS 問題は

$$\min_{a,b} \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2$$

and  $a, b \in \mathbb{R}$

1 階の条件は

$$\sum_{i=1}^n (-1) 2(y_i - a^* - b^* x_i) = 0$$
$$\sum_{i=1}^n (-x_i) 2(y_i - a^* - b^* x_i) = 0$$

すなわち

$$\sum_{i=1}^n (y_i - a^* - b^* x_i) = 0$$
$$\sum_{i=1}^n x_i (y_i - a^* - b^* x_i) = 0$$

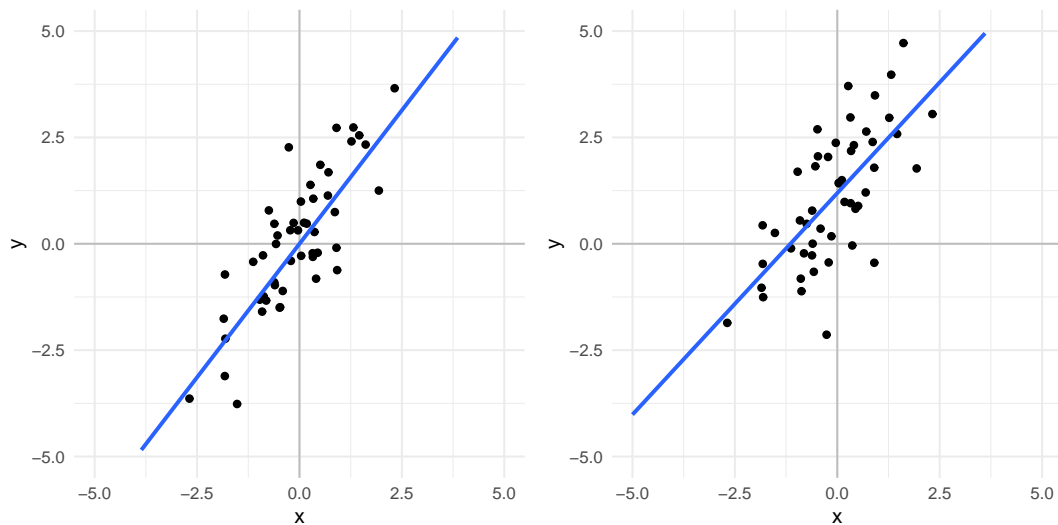


図1 定数項なしの単回帰モデル（左）と定数項ありの単回帰モデル（右）

正規方程式は

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n y_i - na^* - b^* \sum_{i=1}^n x_i &= 0 \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i - a^* \sum_{i=1}^n x_i - b^* \sum_{i=1}^n x_i^2 &= 0 \end{aligned}$$

この連立方程式の解が  $(\alpha, \beta)$  の OLS 推定値.

注 17. 正規方程式の第 1 式を  $n$  で割ると

$$\bar{y} - a^* - b^* \bar{x} = 0$$

したがって  $a^* = \bar{y} - b^* \bar{x}$ . 1 階の条件より

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - a^* - b^* x_i) \\ &= \sum_{i=1}^n x_i (y_i - a^* - b^* x_i) - \bar{x} \sum_{i=1}^n (y_i - a^* - b^* x_i) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$a^* = \bar{y} - b^* \bar{x}$  を左辺に代入すると

$$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})[(y_i - \bar{y}) - b^*(x_i - \bar{x})] = 0$$

これを解くと

$$b^* = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

これは  $\sigma_{XY}/\sigma_X^2$  の推定量 (値) と理解できる.

例 1. 某大学 1 年生の大学での GPA (colgpa) の高校での GPA (hsgpa) への単回帰 (図 2).

$$\widehat{\text{colgpa}} = 0.920577 + 0.524173 \cdot \text{hsgpa}$$

#### 4 今日のキーワード

回帰, 回帰モデル, 説明変数, 被説明変数, 誤差項, 線形回帰モデル, 回帰係数, 単回帰モデル, 重回帰モデル, 偏回帰係数, 限界効果, 弾力性, 残差, 通常の最小 2 乗法 (OLS), 正規方程式, OLS 推定量 (値), 回帰予測, 回帰 (OLS) 残差

#### 5 次回までの準備

復習 教科書第 3 章 4 節, 第 13 章 1-2.1 節, 復習テスト 24

予習 教科書第 13 章 2.2-3 節

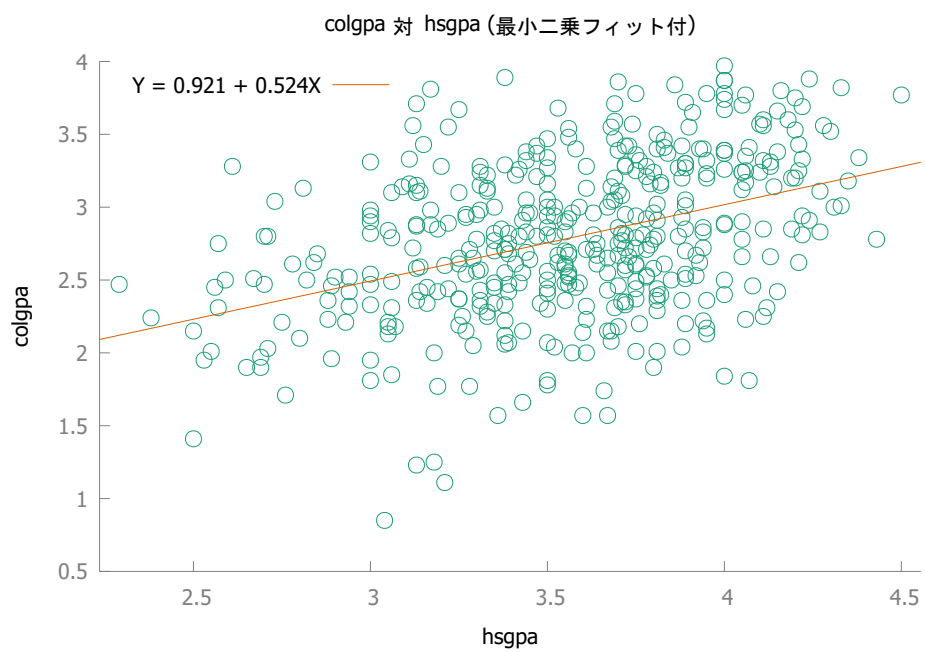


図2 某大学1年生の大学でのGPA (colgpa) の高校でのGPA (hsgpa) への単回帰