

# 回帰分析

## 回帰モデルの考え方と推定

村田 昇

### 講義概要

- 第1回：回帰モデルの考え方と推定
- 第2回：モデルの評価
- 第3回：モデルによる予測と発展的なモデル

### 回帰分析の考え方

#### 回帰分析

- ある変量を別の変量で説明する関係式を構成する
- 関係式：回帰式 (regression equation)
  - 説明される側：目的変数, 被説明変数, 従属変数, 応答変数
  - 説明する側：説明変数, 独立変数, 共変量
- 説明変数の数による分類
  - 一つの場合：単回帰 (simple regression)
  - 複数の場合：重回帰 (multiple regression)

#### 一般の回帰の枠組

- 説明変数： $x_1, \dots, x_p$  (p次元)
- 目的変数： $y$  (1次元)
- 回帰式： $y$  を  $x_1, \dots, x_p$  で説明するための関係式

$$y = f(x_1, \dots, x_p)$$

- 観測データ：n個の  $(y, x_1, \dots, x_p)$  の組

$$\{(y_i, x_{i1}, \dots, x_{ip})\}_{i=1}^n$$

## 線形回帰

- 任意の  $f$  では一般的すぎて分析に不向き
- $f$  として **1 次関数** を考える
  - ある定数  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$  を用いた式：
$$f(x_1, \dots, x_p) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p$$
  - 1 次関数の場合：**線形回帰** (linear regression)
  - 一般の場合：**非線形回帰** (nonlinear regression)
- 非線形関係は新たな説明変数の導入で対応可能
  - 適切な多項式： $x_j^2, x_j x_k, x_j x_k x_l, \dots$
  - その他の非線形変換： $\log x_j, x_j^\alpha, \dots$
  - 全ての非線形関係ではないことに注意

## 回帰係数

- 線形回帰式
  - $$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p$$
  - $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ ：**回帰係数** (regression coefficients)
  - $\beta_0$ ：**定数項 / 切片** (constant term / intersection)
- 線形回帰分析 (linear regression analysis)
  - 未知の回帰係数をデータから決定する分析方法
  - 決定された回帰係数の統計的な性質を診断

## 回帰の確率モデル

- 回帰式の不確定性
  - データは一般に観測誤差などランダムな変動を含む
  - 回帰式がそのまま成立することは期待できない
- 確率モデル：データのばらつきを表す項  $\epsilon_i$  を追加

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_p x_{ip} + \epsilon_i \quad (i = 1, \dots, n)$$

- $\epsilon_1, \dots, \epsilon_n$ ：**誤差項 / 攪乱項** (error / disturbance term)
  - \* 誤差項は独立な確率変数と仮定
  - \* 多くの場合、平均 0、分散  $\sigma^2$  の正規分布を仮定
- **推定** (estimation)：観測データから回帰係数を決定

## 回帰係数の推定

### 残差

- **残差** (residual)：回帰式で説明できない変動
- 回帰係数  $\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p)^T$  を持つ回帰式の残差

$$e_i(\beta) = y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_p x_{ip}) \quad (i = 1, \dots, n)$$

- 残差  $e_i(\beta)$  の絶対値が小さいほど当てはまりがよい

## 最小二乗法

- 残差平方和 (residual sum of squares)

$$S(\boldsymbol{\beta}) = \sum_{i=1}^n e_i(\boldsymbol{\beta})^2$$

- 最小二乗推定量 (least squares estimator)

残差平方和  $S(\boldsymbol{\beta})$  を最小にする  $\boldsymbol{\beta}$

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_p)^\top = \arg \min_{\boldsymbol{\beta}} S(\boldsymbol{\beta})$$

## 行列の定義

- デザイン行列 (design matrix)

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{pmatrix}$$

-  $n \times (p+1)$  行列

## ベクトルの定義

- 目的変数, 誤差, 回帰係数のベクトル

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\beta} = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_p \end{pmatrix}$$

-  $\mathbf{y}, \boldsymbol{\epsilon}$  は  $n$  次元ベクトル

-  $\boldsymbol{\beta}$  は  $p+1$  次元ベクトル

## 行列・ベクトルによる表現

- 確率モデル

$$\mathbf{y} = X\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\epsilon}$$

- 残差平方和

$$S(\boldsymbol{\beta}) = (\mathbf{y} - X\boldsymbol{\beta})^\top (\mathbf{y} - X\boldsymbol{\beta})$$

## 解の条件

- 解  $\beta$  では残差平方和の勾配は零ベクトル

$$\nabla S(\beta) = \left( \frac{\partial S}{\partial \beta_0}(\beta), \frac{\partial S}{\partial \beta_1}(\beta), \dots, \frac{\partial S}{\partial \beta_p}(\beta) \right)^\top = \mathbf{0}$$

- 成分 ( $j = 0, 1, \dots, p$ ) ごとの条件式

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_j}(\beta) = -2 \sum_{i=1}^n \left( y_i - \sum_{k=0}^p \beta_k x_{ik} \right) x_{ij} = 0$$

ただし  $x_{i0} = 1$  ( $i = 1, \dots, n$ )

## 正規方程式

### 正規方程式

- 正規方程式 (normal equation)

$$X^\top X \beta = X^\top y$$

- $X^\top X$  : **Gram 行列** (Gram matrix)
  - $(p+1) \times (p+1)$  行列 (正方行列)
  - 正定対称行列 (固有値が非負)

### 正規方程式の解

- 正規方程式の基本的な性質
  - 正規方程式は必ず解をもつ (一意に決まらない場合もある)
  - 正規方程式の解は最小二乗推定量であるための必要条件
- 解の一意性の条件
  - Gram 行列  $X^\top X$  が **正則**
  - $X$  の列ベクトルが独立 (後述)
- 正規方程式の解

$$\hat{\beta} = (X^\top X)^{-1} X^\top y$$

## 実習

### R : 線形モデルの推定

- 関数 `stats::lm()` による推定

```
lm(formula, data, subset, weights, na.action,
    method = "qr", model = TRUE, x = FALSE, y = FALSE, qr = TRUE,
    singular.ok = TRUE, contrasts = NULL, offset, ...)
#' formula: 目的変数名 ~ 説明変数名 (複数ある場合は + で並べる)
#' data: 目的変数, 説明変数を含むデータフレーム
#' subset: 推定に用いるデータフレームの部分集合を指定 (指定しなければ全て)
```

```
#' na.action: 欠損の扱いを指定 (既定値は option("na.action") で設定された処理)
#' model,x,y,qr: 返値に model.frame,model.matrix, 目的変数,QR 分解を含むか指定
```

## 例：ボルドーワインの価格と気候

- 配布データ wine.csv の回帰分析

```
bw_data <- read_csv(file="data/wine.csv") # データの読み込み
bw_fit <- lm(formula = LPRICE2 ~ . - VINT, # VINTを除く全て
             data = bw_data)
```

```
bw_fit # 推定結果の簡単な表示
```

Call:

```
lm(formula = LPRICE2 ~ . - VINT, data = bw_data)
```

Coefficients:

```
(Intercept)      WRAIN      DEGREES      HRAIN
-12.145334    0.001167    0.616392   -0.003861
      TIME_SV
      0.023847
```

## 練習問題

- データセット Advertising.csv は広告費 (TV, radio, newspapers) と売上の関係を調べたものである。このデータセットを用いて以下の回帰式を推定しなさい。

```
formula = sales ~ TV
formula = sales ~ radio
formula = sales ~ TV + radio
```

- URL: <https://www.statlearning.com/s/Advertising.csv>

- データに関する記載事項 (<https://www.statlearning.com> より)

Datasets in this presentation are taken from “An Introduction to Statistical Learning, with applications in R” (Springer, 2013) with permission from the authors: G. James, D. Witten, T. Hastie and R. Tibshirani.

## 練習問題

- データセット tokyo\_weather.csv は気象庁より取得した東京の気候データを回帰分析用に整理したものである。このデータセットのうち、9月の気候データを用いて、以下の回帰式を推定しなさい。

```
formula = temp ~ solar + press
```

- 参考: <https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>

## 最小二乗推定量の性質

### 解析の上での良い条件

- 最小二乗推定量がただ一つだけ存在する条件
  - $X^T X$  が正則
  - $X^T X$  の階数が  $p+1$
  - $X$  の階数が  $p+1$
  - $X$  の列ベクトルが **1 次独立**

これらは同値条件

## 解析の上での良くない条件

- 説明変数が 1 次従属: **多重共線性** (multicollinearity)
- 多重共線性が強くないように説明変数を選択
  - $X$  の列 (説明変数) の独立性を担保する
  - 説明変数が互いに異なる情報をもつように選ぶ
  - 似た性質をもつ説明変数の重複は避ける

## 推定の幾何学的解釈

- **あてはめ値 / 予測値** (fitted values / predicted values)

$$\hat{y} = X\hat{\beta} = \hat{\beta}_0 X_{\text{第0列}} + \cdots + \hat{\beta}_p X_{\text{第p列}}$$

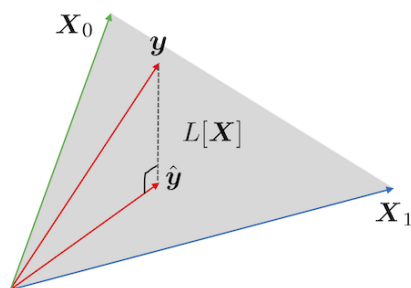


Figure 1:  $n = 3, p + 1 = 2$  の場合の最小二乗法による推定

- 最小二乗推定量  $\hat{y}$  の幾何学的性質
  - $L[X]$ :  $X$  の列ベクトルが張る  $\mathbb{R}^n$  の線形部分空間
  - $X$  の階数が  $p+1$  ならば  $L[X]$  の次元は  $p+1$  (解の一意性)
  - $\hat{y}$  は  $y$  の  $L[X]$  への直交射影
  - **残差** (residuals)  $\hat{e} = y - \hat{y}$  はあてはめ値  $\hat{y}$  に直交

$$\hat{e} \cdot \hat{y} = 0$$

## 線形回帰式と標本平均

- $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, \dots, x_{ip})^T$ :  $i$  番目の観測データの説明変数
- 説明変数および目的変数の標本平均

$$\bar{\mathbf{x}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{x}_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i,$$

- $\hat{\beta}$  が最小二乗推定量のとき以下が成立

$$\bar{y} = (1, \bar{\mathbf{x}}^T) \hat{\beta}$$

## 実習

### R : 推定結果からの情報の取得

- 関数 `lm()` の出力には様々な情報が含まれる

```
#' lmの出力を引数とする base R の関数の例
base::summary(lmの出力) # 推定結果のまとめ
stats::coef(lmの出力) # 推定された回帰係数
stats::fitted(lmの出力) # あてはめ値
stats::resid(lmの出力) # 残差
stats::model.frame(lmの出力) # modelに必要な変数の抽出 (データフレーム)
stats::model.matrix(lmの出力) # デザイン行列
```

### R : broom パッケージ

- 関数 `base::summary()` の tidyverse 版
- 関数 `stats::lm()` の結果を tibble 形式で表示

```
#' 推定結果の tibble 形式での表示
broom::tidy(lmの出力) # 推定結果のまとめ, coef(summary(lmの出力)) と同様
broom::glance(lmの出力) # 評価指標 (統計量) のまとめ, 決定係数や F 値などを整理
broom::augment(lmの出力) # 入出力データのまとめ, あてはめ値・残差などを整理
```

### R : 行列とベクトル

- データフレーム以外の重要なデータ構造
  - ベクトル (vector): 1次元の配列
  - 行列 (matrix): 2次元の同じデータ型の配列
- 必要であれば明示的に変換できる

```
as.vector(データフレーム [列名]) # base::as.vector()
as_vector(データフレーム [列名]) # purrr::as_vector()
as.matrix(データフレーム) # base::as.matrix()
#' データフレームを行列に変換する場合は全て同じデータ型でなくてはならない
```

### R : 行列とベクトルの計算

- 行列  $A, B$  の積  $AB$  およびベクトル  $a, b$  の内積  $a \cdot b$

```
A %% B # 行列の大きさは適切である必要がある
a %% b # ベクトルは同じ長さである必要がある
```

- 正方行列  $A$  の逆行列  $A^{-1}$

```
solve(A) # 他にもいくつか関数はある
```

- $X^T Y$  および  $X^T X$  の計算

```
crossprod(X, Y) # cross product の略
#' X: 行列 (またはベクトル)
#' Y: 行列 (またはベクトル)
crossprod(X) # 同じものを掛ける場合は引数は1つで良い
```

## 練習問題

- 前問の推定結果を用いて最小二乗推定量の性質を確認しなさい
  - 推定された係数が正規方程式の解

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (X^T X)^{-1} X^T \mathbf{y}$$

となること

- あてはめ値と残差が直交すること
- 回帰式が標本平均を通ること

## 残差の分解

### 最小二乗推定量の残差

- 観測値と推定値  $\hat{\boldsymbol{\beta}}$  による予測値の差

$$\hat{\epsilon}_i = y_i - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{i1} + \cdots + \hat{\beta}_p x_{ip}) \quad (i = 1, \dots, n)$$

- 誤差項  $\epsilon_1, \dots, \epsilon_n$  の推定値
- 全てができるだけ小さいほど良い
- 予測値とは独立に偏りが無いほど良い

- 残差ベクトル

$$\hat{\boldsymbol{\epsilon}} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}} = (\hat{\epsilon}_1, \hat{\epsilon}_2, \dots, \hat{\epsilon}_n)^T$$

### 平方和の分解

- $\bar{\mathbf{y}} = \bar{y}\mathbf{1} = (\bar{y}, \bar{y}, \dots, \bar{y})^T$ : 標本平均のベクトル
- いろいろなばらつき
  - $S_y = (\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}})^T (\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}})$ : 目的変数のばらつき
  - $S = (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}})^T (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}})$ : 残差のばらつき ( $\hat{\boldsymbol{\epsilon}}^T \hat{\boldsymbol{\epsilon}}$ )
  - $S_r = (\hat{\mathbf{y}} - \bar{\mathbf{y}})^T (\hat{\mathbf{y}} - \bar{\mathbf{y}})$ : あてはめ値(回帰)のばらつき
- 3つのばらつき(平方和)の関係

$$(\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}})^T (\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}}) = (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}})^T (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) + (\hat{\mathbf{y}} - \bar{\mathbf{y}})^T (\hat{\mathbf{y}} - \bar{\mathbf{y}})$$

$$S_y = S + S_r$$

## 実習

### 練習問題

- 前問の結果を用いて残差の性質を確認しなさい
  - 以下の分解が成り立つこと

$$(\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}})^T (\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}}) = (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}})^T (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) + (\hat{\mathbf{y}} - \bar{\mathbf{y}})^T (\hat{\mathbf{y}} - \bar{\mathbf{y}})$$

$$S_y = S + S_r$$



## 決定係数

### 回帰式の寄与

- ばらつきの分解

$$S_y \text{ (目的変数)} = S \text{ (残差)} + S_r \text{ (あてはめ値)}$$

- 回帰式で説明できるばらつきの比率

$$\text{(回帰式の寄与率)} = \frac{S_r}{S_y} = 1 - \frac{S}{S_y}$$

- 回帰式のあてはまり具合を評価する代表的な指標

### 決定係数 ( $R^2$ 値)

- 決定係数 (R-squared)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \hat{\epsilon}_i^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

- 自由度調整済み決定係数 (adjusted R-squared)

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{\frac{1}{n-p-1} \sum_{i=1}^n \hat{\epsilon}_i^2}{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

- 不偏分散で補正している

## 実習

### 練習問題

- 決定係数を用いてモデルの比較を行いなさい
  - 広告費と売上データ

```
sales ~ TV
sales ~ radio
sales ~ TV + radio
```

- 東京の9月の気候データ

```
temp ~ solar
temp ~ solar + press
temp ~ solar + press + cloud
```

### 次回の予定

- 第1回: 回帰モデルの考え方と推定
- 第2回: モデルの評価
- 第3回: モデルによる予測と発展的なモデル