

物理実験学

(2012 年度生以上は物理実験学 I)

2016 年度 前期

講義メモ ver20160608

(身内担当分)



<http://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/~miuchi>

から 「講義ノートなど」

日程

		内容	対応章
第 1 講	6/13 4 限	確率・統計の概念、期待値、分散、	1-1~1-3
第 2 講	6/20 3 限	ポアソン分布、正規分布	2-1~2-4
第 3 講	6/20 4 限	標本、推定、検定	3-1~4-3
第 4 講	7/4 4 限	電気回路	5
第 5 講	7/11 4 限	粒子物理基礎	6
第 6 講	7/25 4 限	粒子と物質の相互作用、粒子線検出器	7
第 7 講	8/1 4 限	期末試験	

連絡先 自然科学総合研究棟 3 号館 317 号室 / miuchi@panda.kobe-u.ac.jp

参考書 岩波書店 理工系の基礎数学 7 確率・統計 柴田文明

Techniques for Nuclear and Particle physics Experiments, W.R. Leo

Review of Particle Physics (<http://pdg.lbl.gov/>)

参考読み物 ダイヤモンド社 統計学が最強の学問である 西内啓

洋泉社 「素粒子の世界」「素粒子実験の世界」 秋本祐希

丸善出版 ヒッグス粒子の見つけ方 山崎 祐司, 戸本 誠, 花垣 和則

その他随時紹介

この講義の目指すところ

- 物理実験で得られた結果を正しく解釈する。
- ⇔ある仮説は（どれくらいの確率で）棄却されるか？
- 世の中の「統計」を正しく解釈する。：統計リテラシー
- 実験で必要となる最低限の知識を身につける。
- 実験はおもしろい。実験学は どうだ？

成績

- 身内+小手川で 50 点ずつ。
- 身内分 50 点はレポート 20 点+中間 30 点。

レポート課題（7/4 締切 講義前に提出）

「確率的に起こる現象に関連した課題を自ら設定、統計的に研究せよ。テーマは物理に限らない。グラフを必ず入れること。」

採点基準 問題設定（オリジナリティー） 研究内容（分量、統計的定量的な扱いの正しさ、グラフの）

物理実験学

改定 LOG

20160608 : 初版

実験お役立ち知識

べき乗

10^{-15} f(フェムト)

10^{-12} p(ピコ)

10^{-9} n(ナノ)

10^{-6} μ (マイクロ)

10^{-3} m(ミリ)

10^3 k(キロ)

10^6 M(メガ)

10^9 G(ギガ)

10^{12} T(テラ)

10^{15} P(ペタ)

<<第 1 講>>

1. 統計の概念

1.1. 物理実験と統計

記述統計 (*descriptive statistics*)

記述統計とは、収集したデータの要約統計量（平均、分散など）を計算して分布を明らかにする事により、データの示す傾向や性質を知ること。

例： 試験の成績、 国勢調査、

数理統計学・推計統計 (*mathematical statistics*)

データからその元となっている諸性質を確率論的に推測する分野。

例： 標本調査 : 全数調査が不可能であるとき
降水率 : 予測

「実験」で行うこと：データから物理的な値を推測し、それを検定する。

推定：標本から母集団の統計学的な性質を推測すること

検定：母集団が特定の分布に従っているかどうかを検証すること

例；乾電池の寿命

標本を選らんで、寿命を調査→平均寿命、分散を求める
→分布を仮定すると、任意の1個がある寿命以下の確率が求まる

例：放射線物質の含有量

一定時間に計測された放射線の数測定
→含有量が統計誤差で求まる（推定）

*

間違った推定・検定

- 横断歩道での交通事故記録の統計をとったところ、青信号の横断中の方が、赤信号の横断中よりも、交通死亡事故が多いという統計結果が得られた。青信号で渡った方が事故にあう危険が高い。
←母集団における分布をとりいれていない場合
- 小数被験者の実験で結論を出してしまうテレビ番組の検証実験
←統計誤差が考慮されていない場合
- インターネットによるアンケート調査の統計
←標本が無作為抽出されていない場合
- 成功した例しか掲載しないダイエット広告
←作為的なデータの棄却、選択。

基礎概念の定義

- ・ 試行： ある操作
- ・ 標本点 (sample point)： 起こりえる可能な結果
- ・ 標本空間 (sample space)： 標本点の全体の集合 Ω
- ・ 事象 (event)： 起こりえる事柄。標本空間の部分集合
- ・ 空事象 (empty event)： 標本点を一つも含まない起こりえない事柄 ϕ
- ・ 根元事象 (elementary event)： ただ一つの標本点からなる事象
- ・ 複合事象 (composite event)： 複数の標本点を含む事象

例：さいころ

試行： さいころを振って出目をみる

標本点： ‘1’, ‘2’, ‘3’, ‘4’, ‘5’, ‘6’ (‘1’ さいころの目1がでること)

標本空間： { ‘1’, ‘2’, ‘3’, ‘4’, ‘5’, ‘6’ }

空事象： ‘7’

根元事象： { ‘1’ }, { ‘2’ }, { ‘3’ }, { ‘4’ }, { ‘5’ }, { ‘6’ }

複合事象： { 奇数 } = { ‘1’, ‘3’, ‘5’ }

- ・ 和事象 (union of events)： $A \cup B$
A と B の少なくともどちらか一つが起こるという事象
- ・ 積事象 (intersection of events)： $A \cap B$
A と B 両方が同時に起こるという事象
- ・ 補事象 (complementary event)： \bar{A}
事象 A が起こらないという事象 $\bar{A} \cap A = \phi$ $\bar{A} \cup A = \Omega$
- ・ 排反事象 (disjoint events)： 事象 A と C が同時に起こりえないとき， A と C は排反事象

$$A \cap C = \phi$$

- ・ 分配法則

$$(A \cup B) \cap C = (A \cap C) \cup (B \cap C) \quad (1.1.1)$$

$$(A \cap B) \cup C = (A \cup C) \cap (B \cup C) \quad (1.1.2)$$

- ・ ドモルガンの法則

$$\overline{(A \cap B)} = \bar{A} \cup \bar{B} \quad (1.1.3)$$

$$\overline{(A \cup B)} = \bar{A} \cap \bar{B} \quad (1.1.4)$$

○確率

・ 確率(probability) : 事象の起こりやすさを定量的に示すもの

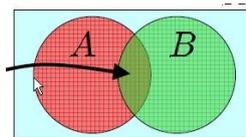
どの根源事象も同じ確からしさでおこるとき、事象Aの起こる確率 $P(A) = \frac{n(A)}{n(\Omega)}$

・ コルモゴロフ (Kolmogorov) の公理

1. 任意の事象に対して $0 \leq P(A) \leq 1$ $P(\phi) = 0$ $P(\Omega) = 1$ (1.1.5)

2. 全確率は1 : $P(\Omega) = 1$ (1.1.6)

3. 互いに排反な事象 A_i に対して $P(\cup A_i) = \sum P(A_i)$ (1.1.7)



・ 加法定理

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B) \quad (1.1.8)$$

・ 条件付き確率

事象Bが起こったとわかっている場合に事象Aが起こる確率を、Bを条件とするAの条件付き確率(conditional probability)とよび $P(A|B)$ と書く。

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad (1.1.9)$$

・ 乗法定理

$$P(A \cap B) = P(A|B)P(B) = P(B|A)P(A) \quad (1.1.10)$$

・ 独立性

事象AとBが $P(A \cap B) = P(A)P(B)$ を満たすとき、AとBは独立(independent)つまり $P(A|B) = P(A)$, $P(B|A) = P(B)$

参考 : 例題1-1

1-1 順列・組合せ

・順列 (permutation) : n 個の異なるものから、r 個のものを取り出して並べたもの
順列の総数は

$${}^n P_r = n \cdot (n-1) \cdot (n-2) \cdots (n-r+1) = \frac{n!}{(n-r)!} \quad (1.2.1)$$

$$n! = 1 \times 2 \times \cdots \times n \quad (\text{階乗}), \quad 0! = 1 \quad (1.2.2)$$

・組み合わせ (combination) : n 個の異なるものから、r 個のものを取り出したもの(順番は気にしない)

組合せの総数は

$${}^n C_r = \frac{{}^n P_r}{r!} = \frac{n!}{r!(n-r)!} \quad (1.2.3)$$

参考 : 例題 1-2

1-2 確率変数・確率分布

○定義

- ・ 確率変数(random variable) : とる値に対して確率が与えられている変数
- ・ 実現値 : 確率変数が実際にとる値
 確率変数は大文字で, 実現値は小文字で表わすことが多い

- ・ 確率分布(probability distribution) : 確率変数の実現値と確率の関係を関数として表現したもの

$$P(X = x) = f(x) \quad (1.3.1)$$

- ・ 累積分布関数(cumulative distribution function) : 確率変数がある値以下をとる確率

$$F(x) = P(X \leq x) \quad (1.3.2)$$

○離散型(discrete type)確率変数 : 可算集合の中の値をとる確率変数

○連続型(continuous type)確率変数 : 連続値をとる確率変数

- ・ 連続型の確率変数の確率分布 : 確率密度関数(probability density function)

$$P(x \leq X \leq x + dx) = f(x)dx \quad (1.3.3)$$

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x)dx \quad (1.3.4)$$

$$P(-\infty \leq X \leq \infty) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1 \quad (1.3.5)$$

- ・ 累積分布関数(cumulative distribution function) : 確率変数がある値以下をとる確率

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(y)dy \quad (1.3.6)$$

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a) \quad (1.3.7)$$

参考 : 例題 1-3

1-3 期待値と分散： 確率変数の性質を表わす指標

○期待値

・期待値(expectation)： 確率変数の値の平均 (正確には確率による重み付きの平均)

確率変数 X の期待値を $E(X)$ または $\langle X \rangle$ で表す

$$\text{離散型} : E(X) = \sum x \cdot f(x) \quad (1.4.1)$$

$$\text{連続型} : E(X) = \int x \cdot f(x) dx \quad (1.4.2)$$

以後, 説明を簡単にするため, 連続型の確率変数を主に扱うことにする. 離散型を考える場合は, 積分を和に変更すればよい.

・期待値演算の性質

- 定数は期待値をとっても値は変わらない

$$E(c) = \int c \cdot f(x) dx = c \int f(x) dx = c \quad (1.4.3)$$

- 定数を足した期待値は, 期待値に定数を足したものと等しい

$$E(X + c) = \int (x + c) \cdot f(x) dx = E(X) + c \quad (1.4.4)$$

- 定数倍の期待値は, 期待値の定数倍と等しい

$$E(cX) = \int cx \cdot f(x) dx = c \int x \cdot f(x) dx = cE(X) \quad (1.4.5)$$

→期待値演算は線形

○分散

分散(variance)： 確率変数の散らばり具合を表す指標。

確率変数 X の分散 $V(X)$

$$V(X) = E[\{X - E(X)\}^2] \quad (1.4.6)$$

$$V(X) = E[\{X - E(X)\}^2] = E[X^2 - 2X \cdot E(X) + (E(X))^2]$$

$$= \int [x^2 - 2x \cdot E(X) + (E(X))^2] f(x) dx$$

$$= \int x^2 f(x) dx - 2E(X) \int x f(x) dx + (E(X))^2 \int f(x) dx$$

$$= E[X^2] - 2E(X) \cdot E[X] + (E(X))^2 \cdot E[1]$$

$$= E[X^2] - (E(X))^2 \quad (1.4.7)$$

• 分散演算の性質

□ 定数の分散はゼロ

$$V(c) = E[\{c - E(c)\}^2] = E[0] = 0 \quad (1.4.8)$$

□ 定数を足したものの分散は、もとの分散と等しい

$$V(X + c) = E[\{X + c - E(X + c)\}^2] = E[\{X - E(X)\}^2] = V(X) \quad (1.4.9)$$

□ 定数倍の分散は、もとの分散に定数の2乗をかけたものと等しい

$$V(cX) = E[\{cX - E(cX)\}^2] = E[c^2\{X - E(X)\}^2] = c^2V(X) \quad (1.4.10)$$

○ 標準偏差

標準偏差(standard deviation) : 分散の平方根

$$D(X) = \sqrt{V(X)} \quad (1.4.11)$$

分散の値を σ^2 で、標準偏差の値を σ で表わすことが多い

○ 標準化(standardization)

任意の確率変数 X に対して

$$Z = \frac{X - E(X)}{D(X)} \quad (1.4.12)$$

と定義すれば、 Z は期待値 0、分散 1 になる

$$E(Z) = \frac{E(X - E(X))}{D(X)} = \frac{E(X) - E(X)}{D(X)} = 0 \quad (1.4.13)$$

$$V(Z) = \frac{V(X - E(X))}{\{D(X)\}^2} = \frac{V(X)}{V(X)} = 1 \quad (1.4.14)$$

期待値 50、分散 10 に規格化したものを一般に「偏差値」と呼んでいる。

*

○ 確率変数の和

確率変数 X と Y が独立である、つまり $f(X, Y) = g(X)h(Y)$ であるとき、

その和 $Z = X + Y$ の期待値 $E(Z)$ は

$$\begin{aligned} E(Z) &= E(X + Y) = \iint (x + y)f(X, Y)dxdy \\ &= \iint (x + y)g(x)h(y)dxdy \\ &= \int xg(x)dx \int h(y)dy + \int g(x)dx \int yh(y)dy = E(X) + E(Y) \end{aligned} \quad (1.4.15)$$

Z の分散 $V(Z)$ は (1.4.7) より

$$V(Z) = E[(X + Y)^2] - \{E(X + Y)\}^2 \quad (1.4.16)$$

$$E[(X + Y)^2] = \iint (x + y)^2 f(X, Y)dxdy = \iint (x + y)^2 g(x)h(y)dxdy$$

$$\begin{aligned}
 &= \int x^2 g(x) dx \int h(y) dy + 2 \int xg(x) dx \int yh(y) dy + \int g(x) dx \int y^2 h(y) dy \\
 &= E(X^2) + 2E(X)E(Y) + E(Y^2) \\
 V(Z) &= \{E(X^2) + 2E(X)E(Y) + E(Y^2)\} - \{E(X) + E(Y)\}^2 \\
 &= E(X^2) - (E(X))^2 + E(Y^2) - (E(Y))^2 = \boxed{V(X) + V(Y)} \tag{1.4.17}
 \end{aligned}$$

○確率変数の積

確率変数 X と Y が独立である、つまり $f(X, Y) = g(X)h(Y)$ であるとき、その積 $Z = XY$ の期待値 $E(Z)$ は

$$\begin{aligned}
 \boxed{E(Z)} &= E(XY) = \iint (xy) f(X, Y) dx dy = \iint (xy) g(x) h(y) dx dy \\
 &= \int xg(x) dx \int yh(y) dy = E(X)E(Y) \tag{1.4.18}
 \end{aligned}$$

となる。

Z の分散 $V(Z)$ は

$$\boxed{V(Z)} = E[(XY)^2] - \{E(XY)\}^2 \tag{1.4.19}$$

$$\begin{aligned}
 E[(XY)^2] &= \iint (xy)^2 f(X, Y) dx dy = \int x^2 g(x) dx \int y^2 h(y) dy = E(X^2)E(Y^2) \\
 &= \{V(X) + (E(X))^2\} \{V(Y) + (E(Y))^2\} \tag{1.4.20}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V(Z) &= \{E(X^2)E(Y^2)\} - \{E(X)E(Y)\}^2 \\
 &= V(X)V(Y) + V(X)(E(Y))^2 + V(Y)(E(X))^2 \\
 &= \boxed{(E(Z))^2 \left\{ \frac{V(X)}{(E(X))^2} + \frac{V(Y)}{(E(Y))^2} + \frac{V(X)}{(E(X))^2} \frac{V(Y)}{(E(Y))^2} \right\}} \tag{1.4.21}
 \end{aligned}$$

相対誤差 $V(X)/(E(X))^2$ が小さいとき第三項を無視できて

$$\frac{V(Z)}{(E(Z))^2} \cong \left\{ \frac{V(X)}{(E(X))^2} + \frac{V(Y)}{(E(Y))^2} \right\} \tag{1.4.21}$$

○誤差の伝播

確率変数 X と Y が独立である、つまり $f(X, Y) = g(X)h(Y)$ であるときの、 X, Y の関数 $Z(X, Y)$ の期待値と分散を考える。

相対誤差 $V(X)/(E(X))^2$ 、 $V(Y)/(E(Y))^2$ が小さいとき(つまり x, y とも期待値の近くに分布する)

$Z = Z(X, Y)$ を $Z(\bar{x} = E(X), \bar{y} = E(Y))$ のまわりで Taylor 展開して

$$Z(x, y) \cong Z(\bar{x}, \bar{y}) + \frac{\partial Z}{\partial x}(x - \bar{x}) + \frac{\partial Z}{\partial y}(y - \bar{y}) \quad (1.4.22)$$

$E(Z)$ は

$$E(Z) \cong \iint \left\{ Z(\bar{x}, \bar{y}) + \frac{\partial Z}{\partial x}(x - \bar{x}) + \frac{\partial Z}{\partial y}(y - \bar{y}) \right\} g(x)h(y) dx dy = Z(\bar{x}, \bar{y}) \quad (1.4.23)$$

分散 $V(Z)$ は

$$\begin{aligned} V(Z) &= \iint \{Z(x, y) - E(Z)\}^2 f(X, Y) dx dy = \iint \left\{ \frac{\partial Z}{\partial x}(x - \bar{x}) + \frac{\partial Z}{\partial y}(y - \bar{y}) \right\}^2 g(x)h(y) dx dy \\ &= \left(\frac{\partial Z}{\partial x}\right)^2 \int (x - \bar{x})^2 g(x) dx + \left(\frac{\partial Z}{\partial y}\right)^2 \int (y - \bar{y})^2 h(y) dy + \left(\frac{\partial Z}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial Z}{\partial y}\right) \int (x - \bar{x}) g(x) dx \int (y - \bar{y}) h(y) dy \\ &= \left(\frac{\partial Z}{\partial x}\right)^2 V(X) + \left(\frac{\partial Z}{\partial y}\right)^2 V(Y) \end{aligned} \quad (1.4.24)$$

<<第 1 講ここまで>>

第1講に関連した例題

例題1-1) 確率

A: {さいころを振って奇数が出るという事象}、B: {さいころを振って3以下の目が出るという事象}を定める。A、Bの標本空間を書き、それぞれの確率を計算せよ。P(A ∩ B)および P(A ∪ B)を求めよ。 P(A|B)を求めよ。

(解答例)

$$A = \{ '1', '3', '5' \} \quad P(A) = \frac{3}{6} \quad B = \{ '1', '2', '3' \} \quad P(B) = \frac{3}{6}$$

$$A \cap B = \{ '1', '3' \} \quad P(A \cap B) = \frac{2}{6}$$

$$A \cup B = \{ '1', '2', '3', '5' \} \quad P(A \cup B) = \frac{4}{6} \quad P(A) + P(B) - P(A \cap B) = \frac{3}{6} + \frac{3}{6} - \frac{2}{6} = \frac{4}{6}$$

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} = \frac{2}{3} \quad P(A|B)P(B) = \frac{2 \cdot 3}{3 \cdot 6} = \frac{2}{6}$$

例題 1-2) 確率

袋の中に A が M個、B が N-M個、合計 N個の玉が入っている。

この袋から無作為に玉を n個取り出したときに A の数が x個、B の数を n-x個である確率を求めよ。

(解答例)

$$f(x) = \frac{M^x \cdot (N-M)^{n-x}}{N^x} \quad (1.2.4)$$

例題1-3) : 確率変数

確立変数、実現値、確率分布をさいころを振った時の出目、時計の分針の角度について説明せよ。

(解答例)

確率変数X: さいころを振った時の出目の値

実現値x: 1, 2, 3, 4, 5, 6

$$P(X=x) = f(x) = \frac{1}{6}, \quad x = 1,2,3,4,5,6 \quad F(x) = \frac{x}{6}$$

確率変数X: 時計の分針の角度

実現値x: $0 \leq x < 360$

$$f(x) = \frac{1}{360}$$

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_0^x \frac{1}{360} dy = \frac{x}{360}$$

$$P(a \leq X \leq b) = F(b) - F(a) = \frac{b-a}{360}$$

例題 1-4) 期待値と分散

さいころを1つふったときの期待値と分散を求めよ。

(解答例)

$$\sum_{N=1}^6 N = 21, \quad \sum_{N=1}^6 N^2 = 91, \quad \sum_{N=1}^6 N^3 = 441$$

$$\langle X \rangle = \sum_{i=1}^6 i \times \frac{1}{6} = \frac{7}{2}$$

$$\sigma^2_X = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2 = \frac{1}{6} \sum_{i=0}^6 i^2 - \left(\frac{1}{6} \sum_{i=0}^6 i \right)^2 = \frac{91}{6} - \left(\frac{7}{2} \right)^2 = \frac{182 - 147}{12} = \frac{35}{12}$$

例題 1-5) 期待値と分散

さいころを2つふったときの平均値の、期待値と分散を求めよ。

(解答例)

$$E\left(\frac{X+Y}{2}\right) = \frac{E(X) + E(Y)}{2} = E(X) = 3.5$$

$$V\left(\frac{X+Y}{2}\right) = \frac{V(X) + V(Y)}{4} = \frac{V(X)}{2} = \frac{35}{24}$$

例題 1-6) 期待値と分散

さいころを2つふったとき、大きい目から小さい目を引いたときの値 Z の、期待値と分散を求めよ。

(解答例)

同じ目が出るのは6通り

差が z ($1 \leq z \leq 5$) になるのは、 $2(6-z)$ 通り

$$\sum_{z=0}^5 z = 15, \quad \sum_{z=0}^5 z^2 = 55, \quad \sum_{z=0}^5 z^3 = 225$$

$$E(Z) = \sum_{z=0}^5 P(z)z = \sum_{z=1}^5 \frac{2(6-z)}{36} z = \frac{1}{3} \sum_{z=1}^5 z - \frac{1}{18} \sum_{z=1}^5 z^2 = \frac{15}{3} - \frac{55}{18} = \frac{35}{18}$$

$$V(Z) = E(Z^2) - (E(Z))^2 = \sum_{z=0}^5 P(z)z^2 - \left(\frac{35}{18}\right)^2 = \sum_{z=1}^5 \frac{2(6-z)}{36} z^2 - \left(\frac{35}{18}\right)^2$$

$$= \frac{1}{3} \sum_{z=1}^5 z^2 - \frac{1}{18} \sum_{z=1}^5 z^3 - \left(\frac{35}{18}\right)^2$$

$$= \frac{55}{3} - \frac{225}{18} - \left(\frac{35}{18}\right)^2 = \frac{5}{18^2} [1188 - 810 - 245] = \frac{665}{324}$$

例題 1-7) 期待値と分散

正 20 面体さいころの各面に “1” ~ “10” までの数字が (各数字 2 面ずつ) ふってあり、各数字が出る確率はどれも等しいとする。

- (1) 正 20 面体さいころをふったときの期待値と分散を求めなさい
- (2) 20 面体さいころを 100 個ふったとき、その目の平均値 (100 個ののさいころの目の和 ÷ 100) の期待値と分散を求めなさい
- (3) 20 面体さいころを 100 個ふったとき、“7” の目のでたさいころの数の期待値と分散を求めなさい
- (4) さいころを “7” の目がでるまで何度でも振り、 X 回めではじめて “7” が出たとする。 X の期待値と分散を求めなさい

ヒント:

$$S(a) = \sum_{N=1}^{\infty} a^N = \frac{a}{1-a}, \quad a \frac{d}{da} S(a) = \sum_{N=1}^{\infty} N a^N,$$

(解答例)

(1) $\langle X \rangle = 5.5$

$$\sigma_X^2 = \{ \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2 \} = \frac{385}{10} - \left(\frac{55}{10} \right)^2 = 8.25 (= 33/4)$$

(2) $\langle \bar{X} \rangle = \langle X \rangle = 5.5$

中心極限定理より、 $\sigma^2 = 8.25/100 = 0.0825$

(3) これは $B(n=100, p=0.1)$ のベルヌーイ試行

よって、 $\langle X \rangle = np = 10$

分散は $\sigma^2 = np(1-p) = 9$

(4) X 回めではじめて “7” が出る確率は

$$P(x) = (0.1)(0.9)^{x-1}$$

よって期待値は

$$\langle X \rangle = \sum_{N=1}^{\infty} NP(N) = \frac{0.1}{0.9} \sum_{N=1}^{\infty} N 0.9^N = \frac{0.1}{0.9} \frac{0.9}{(1-0.9)^2} = 10$$

分散は

$$\langle X^2 \rangle = \sum_{N=1}^{\infty} N^2 P(N) = \frac{0.1}{0.9} \sum_{N=1}^{\infty} N^2 0.9^N = \frac{0.1}{0.9} \frac{0.9^2 + 0.9}{(1-0.9)^3} = 190$$

$$\sigma^2 = 190 - 10^2 = 90$$

<<第2講>>

2-1 ベルヌーイ試行と二項分布

○二項分布

ベルヌーイ試行(Bernoulli trials)：2つの根源事象しかない標本空間を考える。一回の試行で一方の根源事象 A が起こる確率を p とする。この実験を同じ条件で独立に回繰り返すこと。

n 回のベルヌーイ試行に対して、 x 回事象 A が起こる確率は

$$f(x) = {}_n C_x \cdot p^x \cdot (1-p)^{n-x} \quad (2.1.1)$$

これを二項分布(Binomial distribution)とよび、 $B(n, p)$ で表す

・二項分布の全確率

$$\sum_{x=0}^n f(x) = 1 \text{ を示す。}$$

二項定理より

$$(p+q)^n = \sum_{x=0}^n {}_n C_x \cdot p^x \cdot q^{n-x} \quad (2.1.2)$$

$q = 1-p$ を代入して

$$1 = (p+1-p)^n = \sum_{x=0}^n {}_n C_x \cdot p^x \cdot (1-p)^{n-x} \quad (2.1.3)$$

$$\therefore \sum_{x=0}^n f(x) = \sum_{x=0}^n {}_n C_x \cdot p^x \cdot (1-p)^{n-x} = 1 \quad (2.1.4)$$

・二項分布の期待値

1 回ごとの確率×回数 直感的に理解しやすい。

$$E(X) = \sum_{x=0}^n x f(x) = \sum_{x=0}^n x {}_n C_x \cdot p^x \cdot (1-p)^{n-x} = np \quad (2.1.5)$$

これを証明するために、準備として二項定理の両辺を p で微分する。

$$\frac{\partial}{\partial p} (p+q)^n = \frac{\partial}{\partial p} \sum_{x=0}^n {}_n C_x \cdot p^x \cdot q^{n-x} \quad (2.1.6)$$

$$n(p+q)^{n-1} = \sum_{x=0}^n {}_n C_x \cdot x \cdot p^{x-1} \cdot q^{n-x} \quad (2.1.7)$$

この右辺に p を掛け、 $q = 1-p$ を代入すると求めるものとなるので、

$$E(X) = \sum_{x=0}^n x {}_n C_x \cdot p^x \cdot (1-p)^{n-x} = p \cdot n(p+1-p)^{n-1} = np \quad (2.1.8)$$

・二項分布の分散

$$V(X) = E(X^2) - \{E(X)\}^2 = np(1-p) \quad (2.1.9)$$

$$E(X^2) = \sum_{x=0}^n x^2 f(x) = \sum_{x=0}^n x^2 {}_n C_x \cdot p^x \cdot (1-p)^{n-x} \quad (2.1.10)$$

これを証明するために、準備として二項定理の両辺を p で2階微分する。

$$\frac{\partial^2}{\partial p^2} (p+q)^n = \frac{\partial^2}{\partial p^2} \sum_{x=0}^n {}_n C_x \cdot p^x \cdot q^{n-x} \quad (2.1.11)$$

$$n(n-1)(p+q)^{n-2} = \sum_{x=0}^n {}_n C_x \cdot x(x-1) \cdot p^{x-2} \cdot q^{n-x} \quad (2.1.12)$$

よって

$$E(X^2) = \sum_{x=0}^n x^2 f(x) = \sum_{x=0}^n x^2 {}_n C_x \cdot p^x \cdot (1-p)^{n-x}$$

$$= p^2 \sum_{x=0}^n (x^2 - x) {}_n C_x \cdot p^{x-2} \cdot (1-p)^{n-x} + p \sum_{x=0}^n x {}_n C_x \cdot p^{x-1} \cdot (1-p)^{n-x}$$

$$= p^2 \{n(n-1)(p+1-p)^{n-2}\} + p \{n(p+1-p)^{n-1}\} = n(n-1)p^2 + np \tag{2.1.13}$$

$$V(X) = E(X^2) - \{E(X)\}^2 = n(n-1)p^2 + np - (np)^2 = np(1-p) \tag{2.1.14}$$

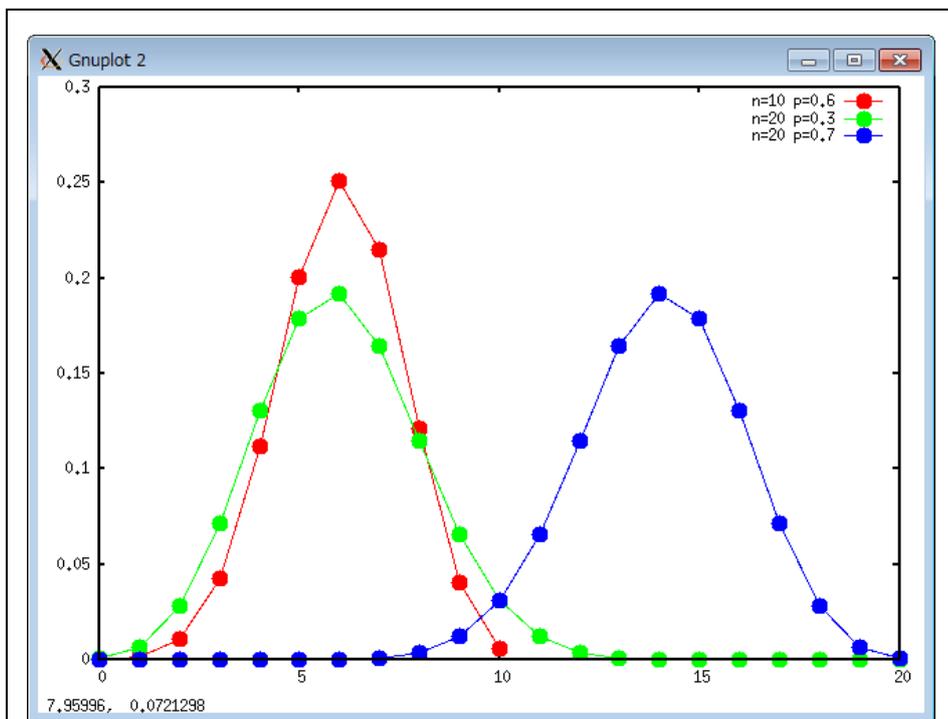


図 2.1.1 n=10,p=0.6(赤) n=20,p=0.3(緑) n=20,p=0.7(青)の二項分布の確率分布関数。

2-2 ポアソン分布

・ポアソン分布の定義

ベルヌーイ試行に対して、事象 A が起こる回数の期待値 $\mu \equiv np$ を固定して

$n \rightarrow \infty, p \rightarrow 0$ とした極限を考える

二項分布 $B(n, p)$ を μ を用いて書き換えて

$$f(x) = \frac{n(n-1)(n-2)\cdots(n-x+1)}{x!} \cdot \left(\frac{\mu}{n}\right)^x \cdot \left(1 - \frac{\mu}{n}\right)^{n-x}$$

$$= \frac{n}{n} \cdot \frac{n-1}{n} \cdots \frac{n-x+1}{n} \frac{\mu^x}{x!} \left(1 - \frac{\mu}{n}\right)^{n-x} \quad (2.2.1)$$

$n \gg x$ であるから、

$$f(x) \cong \frac{\mu^x}{x!} \left(1 - \frac{\mu}{n}\right)^n \quad (2.2.2)$$

$n \rightarrow \infty$ の極限では $\left(1 - \frac{\mu}{n}\right)^n = e^{-\mu}$ なので (指数関数の定義)

$$f(x) \cong \frac{\mu^x}{x!} e^{-\mu} \equiv P(x, \mu) \quad (2.2.3)$$

これをポアソン分布 (Poisson distribution) と呼ぶ。

・ポアソン分布の全確率

$$\sum_{x=0}^{\infty} P(x, \mu) = e^{-\mu} \sum_{x=0}^{\infty} \frac{\mu^x}{x!} = e^{-\mu} e^{\mu} = 1$$

・ポアソン分布の期待値

$$E(X) = \sum_{x=0}^{\infty} x P(x, \mu) = e^{-\mu} \sum_{x=0}^{\infty} x \frac{\mu^x}{x!} = \mu e^{-\mu} \sum_{x=0}^{\infty} \frac{\mu^x}{x!} = \mu \quad (2.2.4)$$

期待値 μ の二項分布の極限をとったことともコンシステント

・ポアソン分布の分散

$$E(X^2) = \sum_{x=0}^{\infty} x^2 P(x, \mu) = e^{-\mu} \sum_{x=0}^{\infty} \{x(x-1) + x\} \frac{\mu^x}{x!}$$

$$= \mu^2 e^{-\mu} \sum_{x=0}^{\infty} \frac{\mu^{x-2}}{(x-2)!} + \mu e^{-\mu} \sum_{x=0}^{\infty} \frac{\mu^{x-1}}{(x-1)!} = \mu^2 e^{-\mu} \sum_{x=0}^{\infty} \frac{\mu^x}{x!} + \mu e^{-\mu} \sum_{x=0}^{\infty} \frac{\mu^x}{x!} = \mu^2 + \mu$$

(1.6.5)

$$V(X) = E(X^2) - \{E(X)\}^2 = \mu^2 + \mu - \mu^2 = \mu \quad (2.2.5)$$

これは二項分布の分散の極限 $np(1-p) \rightarrow \mu$ ともコンシステント

ポアソン分布の理解：

「事象 A が起こる回数の期待値 $\mu \equiv np$ を固定して $n \rightarrow \infty, p \rightarrow 0$ とした極限をとる」

まれな事象を多数回観測するとポアソン分布になることが多い。自然科学の計測ではよくおこる。

例：放射線計測 10秒ごとに観測される数少ない計数を数える

バクテリアの観測数 ある面積中に観測されるバクテリアの数

*

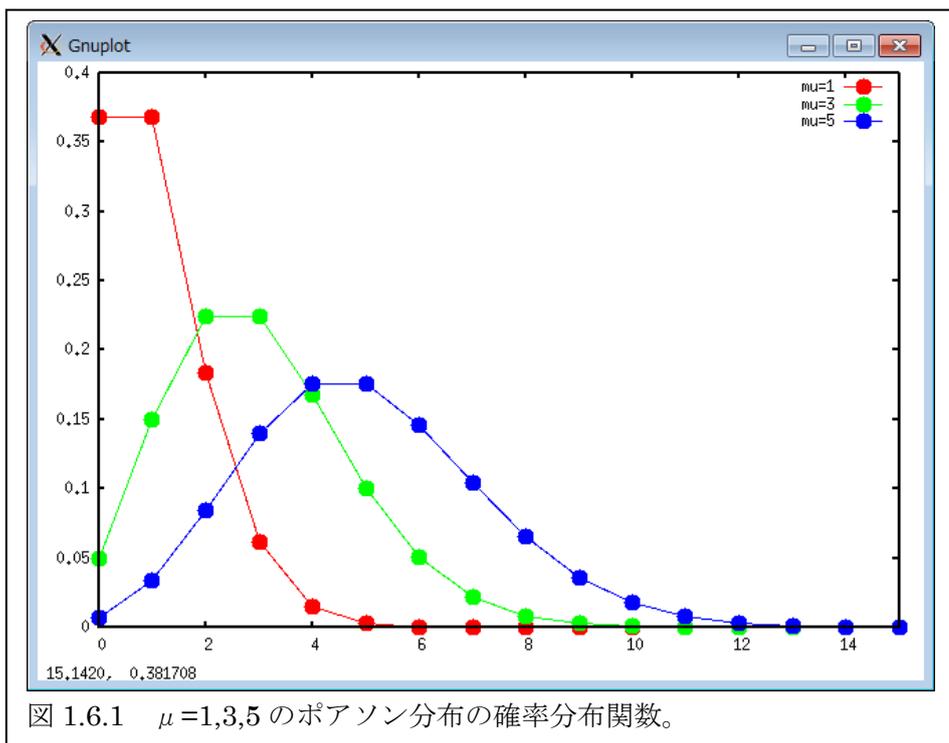


図 1.6.1 $\mu = 1, 3, 5$ のポアソン分布の確率分布関数。

2-3 正規分布

・定義

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.3.1)$$

を正規分布、またはガウス分布という。

規格化には

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-a(x-b)^2) dx = \sqrt{\frac{\pi}{a}} \quad (2.3.2)$$

を使っている。

・正規分布の導出（二項分布より）

正規分布は二項分布の極限を考えることで比較的簡単に導出可能である。

期待値のまわりの相対的なバラツキを表す、二項分布の期待値と標準偏差の比

$$\frac{D(X)}{E(X)} = \frac{\sqrt{np(1-p)}}{np} = \sqrt{\frac{1-p}{p}} \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (2.3.3)$$

は n が大きくなると小さくなる。すなわち、 n が大きくなると分布は期待値 np にピークをもつ。

ここで、 $n \gg 1$ の場合を考える。実現値 $x \gg 1$ となり x を連続変数として考える。確率分布

$$f(x) = {}_n C_x \cdot p^x \cdot (1-p)^{n-x} \quad (2.3.4)$$

の最大値を求めるため、 $\ln\{f(x)\}$ の極値を求めてみよう。

$$\ln\{f(x)\} = \ln\{n!\} - \ln\{x!\} - \ln\{(n-x)!\} + x \ln(p) + (n-x) \ln(1-p) \quad (2.3.5)$$

$$\frac{d}{dx} \ln\{f(x)\} = -\frac{d}{dx} \ln\{x!\} - \frac{d}{dx} \ln\{(n-x)!\} + \ln(p) - \ln(1-p) \quad (2.3.6)$$

ここで

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \ln\{x!\} &= \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{\ln\{(x+\Delta)!\} - \ln\{x!\}}{\Delta} = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta} \ln \left\{ \frac{(x+\Delta)!}{x!} \right\} \cong \lim_{\Delta \rightarrow 1} \frac{1}{\Delta} \ln\{x+\Delta\} \\ &= \ln\{x+1\} \cong \ln\{x\} \end{aligned} \quad (2.3.7)$$

別解

スターリングの公式

$$\ln\{n!\} \cong n \cdot \ln\{n\} - n \quad (2.3.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \ln\{x!\} &= \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{\ln\{(x+\Delta)!\} - \ln\{x!\}}{\Delta} \cong \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{(x+\Delta) \ln\{(x+\Delta)\} - (x+\Delta) - x \ln\{x\} + x}{\Delta} \\ &= \lim_{\Delta \rightarrow 0} \left[\frac{x \ln\left(1 + \frac{\Delta}{x}\right)}{\Delta} + \ln\{x+\Delta\} - 1 \right] = \ln\{x\} \end{aligned} \quad (2.3.9)$$

よって

$$\frac{d}{dx} \ln\{f(x)\} = -\ln\{x\} + \ln\{n-x\} + \ln(p) - \ln(1-p) = \ln\left(\frac{n-x}{x}\right) - \ln\left(\frac{1-p}{p}\right) \quad (2.3.10)$$

これは、 $x = \mu \equiv np$ のとき0となり、極値をとる。

さらに二階微分をとると

$$\frac{d^2}{dx^2} \ln\{f(x)\} = -\frac{1}{x} - \frac{1}{n-x} \quad (2.3.11)$$

$x = \mu \equiv np$ のときの値は

$$\left[\frac{d^2}{dx^2} \ln\{f(x)\}\right]_{x=\mu} = -\frac{1}{\mu} - \frac{1}{n-\mu} = -\frac{n}{\mu(n-\mu)} = -\frac{1}{np(1-p)} \equiv -\frac{1}{\sigma^2} \quad (2.3.12)$$

さて、 $\ln\{f(x)\}$ を $x = \mu \equiv np$ のまわりでテーラー展開すると

$$\begin{aligned} \ln\{f(x)\} &= \ln\{f(\mu)\} + (x-\mu) \left[\frac{d}{dx} \ln\{f(x)\}\right]_{x=\mu} + \frac{(x-\mu)^2}{2} \left[\frac{d^2}{dx^2} \ln\{f(x)\}\right]_{x=\mu} + \dots \\ &\cong \ln\{f(\mu)\} - \frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \end{aligned} \quad (2.3.13)$$

よって、

$$f(x) = f(\mu) \cdot \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.3.14)$$

・正規分布の導出 (一般の場合)

一般に似た性質を持つ確率変数について、 n を大きくするにつれて正規分布が得られる。

・正規分布の期待値

$$E(X) = \int xf(x)dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int (x-\mu) \cdot \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx + \frac{\mu}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx = \mu \quad (2.3.15)$$

・正規分布の分散

$$V(X) = \int (x-E(X))^2 f(x)dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int (x-\mu)^2 \cdot \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx \quad (2.3.16)$$

ここで

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-a(x-b)^2) dx = \sqrt{\frac{\pi}{a}} \quad (2.3.17)$$

の両辺を a で微分して

$$-\int_{-\infty}^{+\infty} (x-b)^2 \exp(-a(x-b)^2) dx = -\frac{1}{2a} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \quad (2.3.18)$$

よって

$$V(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int (x-\mu)^2 \cdot \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \sigma^2 \sqrt{2\pi\sigma^2} = \sigma^2 \quad (2.3.19)$$

・正規分布の性質

- 正規分布は図 2.3.1 及び図 2.3.2 のような確率密度関数を持つ
 - ポアソン分布の期待値 n の値が大きくなるとポアソン分布は期待値 μ 、標準偏差 \sqrt{n} の正規分布に近づく。⇒ 一回のみ測定する正規分布の計数を n の時、標準偏差は \sqrt{n} と考えることができる。

- FWHM (Full Width at the Half Maximum 半値全幅) 正規分布のピークの半分の高さの幅を FWHM と呼び

$$\text{FWHM} = 2.35 \sigma \tag{2.3.20}$$

の関係がある。

↓ μ

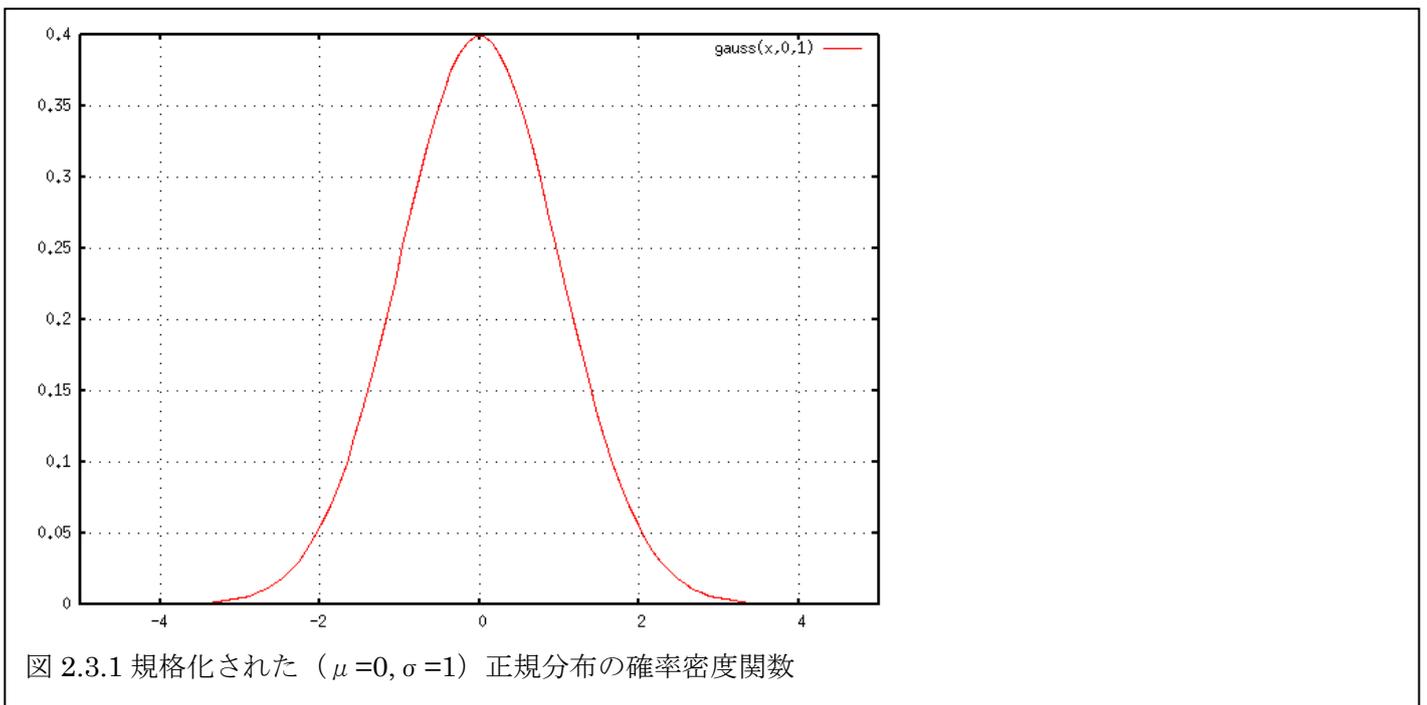


図 2.3.1 規格化された ($\mu=0, \sigma=1$) 正規分布の確率密度関数

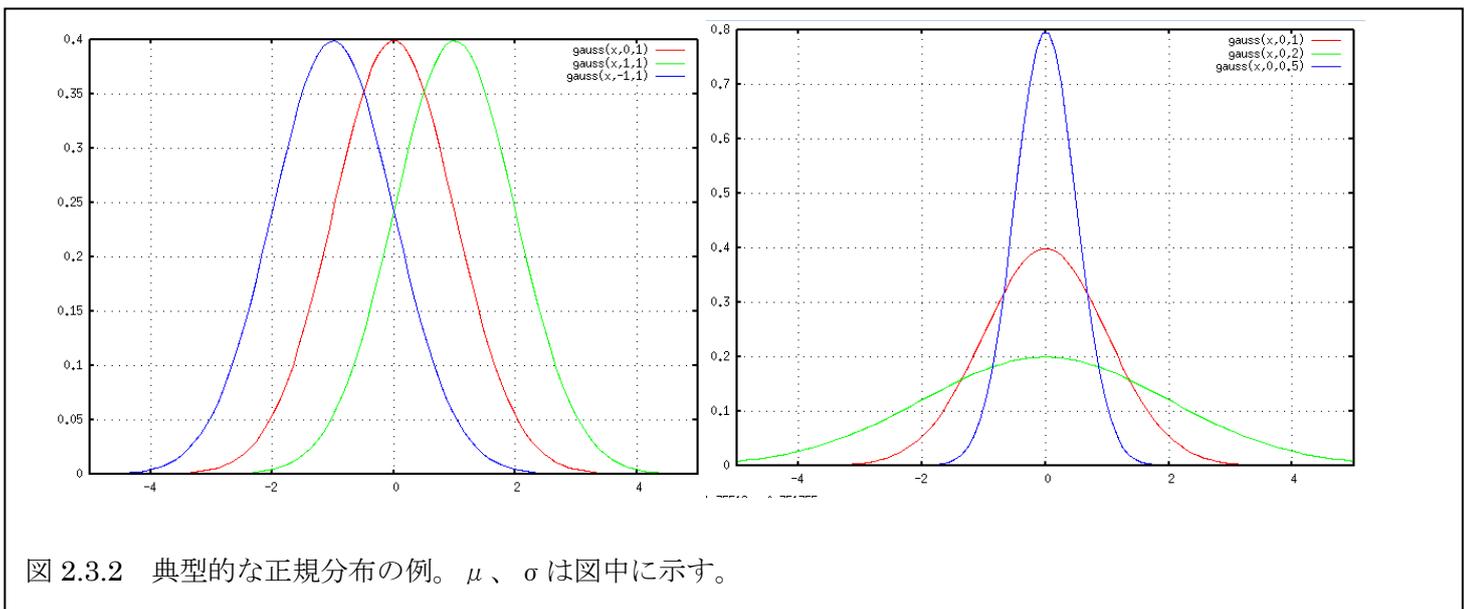


図 2.3.2 典型的な正規分布の例。 μ 、 σ は図中に示す。

正規分布は表 2.3.1 のような分布を持つ

Table 33.1: Area of the tails α outside $\pm\delta$ from the mean of a Gaussian distribution.

α	δ	α	δ
0.3173	1σ	0.2	1.28σ
4.55×10^{-2}	2σ	0.1	1.64σ
2.7×10^{-3}	3σ	0.05	1.96σ
6.3×10^{-5}	4σ	0.01	2.58σ
5.7×10^{-7}	5σ	0.001	3.29σ
2.0×10^{-9}	6σ	10^{-4}	3.89σ

表 2.3.1 母分散 σ^2 の正規分布で信頼度 $1-\alpha$ を与える δ 。

2011 Review of Particle Physics (J. Phys. G **37**, 075021 (2010))

http://pdg.lbl.gov/2011/reviews/contents_sports.html

1-4 特性関数

○特性関数

確率変数 X に対して、実数パラメータ ξ の関数として

$$\Phi(\xi) = \langle \exp(i\xi X) \rangle = \int f(x) \exp(i\xi x) dx \quad (1.8.1)$$

を導入して、これを特性関数 (characteristic function) とよぶ。(確率関数と同等の情報を持ち数学的に扱いやすい。)

指数関数をテーラー展開して

$$\Phi(\xi) = \langle \exp(i\xi X) \rangle = \langle \sum \frac{(i\xi X)^n}{n!} \rangle = \sum \frac{(i\xi)^n}{n!} \langle X^n \rangle \quad (1.8.2)$$

・期待値・分散

特性関数が与えられていると、期待値、分散を求めることができる。

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \Phi(\xi) = \int f(x) \frac{\partial}{\partial \xi} \exp(i\xi x) dx = i \int x f(x) \exp(i\xi x) dx \quad (1.8.3)$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial \xi} \Phi(\xi) \right|_{\xi=0} = i \int x f(x) dx = i \langle X \rangle \quad (1.8.4)$$

$$\therefore \langle X \rangle = -i \left. \frac{\partial}{\partial \xi} \Phi(\xi) \right|_{\xi=0} \quad (1.8.5)$$

$$\left. \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \Phi(\xi) \right|_{\xi=0} = \int f(x) \left. \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \exp(i\xi x) \right|_{\xi=0} dx = - \int x^2 f(x) dx = - \langle X^2 \rangle \quad (1.8.6)$$

$$\therefore V(X) = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2 = - \left. \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \Phi(\xi) \right|_{\xi=0} + \left\{ \left. \frac{\partial}{\partial \xi} \Phi(\xi) \right|_{\xi=0} \right\}^2 \quad (1.8.7)$$

**

例：正規分布の特性関数

$$\begin{aligned} \Phi(\xi) &= \langle \exp(i\xi X) \rangle = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \exp(i\xi x) dx \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[i\mu\xi - \frac{1}{2}\sigma^2\xi^2\right] \int \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(x-\mu-i\sigma^2\xi)^2\right] dx \\ &= \exp\left[i\mu\xi - \frac{1}{2}\sigma^2\xi^2\right] \end{aligned} \quad (1.8.8)$$

期待値と分散を求めてみよう

$$\langle X \rangle = -i \left. \frac{\partial}{\partial \xi} \Phi(\xi) \right|_{\xi=0} = -i \left. \frac{\partial}{\partial \xi} \exp\left[i\mu\xi - \frac{1}{2}\sigma^2\xi^2\right] \right|_{\xi=0} = \mu \quad (1.8.9)$$

$$V(X) = - \left. \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \exp\left[i\mu\xi - \frac{1}{2}\sigma^2\xi^2\right] \right|_{\xi=0} + \left\{ \left. \frac{\partial}{\partial \xi} \exp\left[i\mu\xi - \frac{1}{2}\sigma^2\xi^2\right] \right|_{\xi=0} \right\}^2$$

$$= \mu^2 + \sigma^2 - \mu^2 = \sigma^2 \quad (1.8.10)$$

ここで、 $\exp\left[(i\xi)\langle X \rangle + \frac{(i\xi)^2}{2}\sigma^2\right]$ という量を考えてみよう。 ξ の2次迄の近似で考えると

$$\exp\left[(i\xi)\langle X \rangle + \frac{(i\xi)^2}{2}\sigma^2\right] \cong 1 + (i\xi)\langle X \rangle + \frac{(i\xi)^2}{2}(\sigma^2 + \langle X \rangle^2) + O(\xi^3) = 1 + (i\xi)\langle X \rangle + \frac{(i\xi)^2}{2}\langle X^2 \rangle + O(\xi^3)$$

であり、 ξ の2次迄の近似で特性関数と一致する

2-4 チェビシエフ不等式

ベルヌーイ試行 $B(n, p)$ の期待値は $\langle X \rangle = np$ 、分散は $\sigma^2 = np(1 - p)$ である。((1.5.5) (1.5.9))

試行 1 回あたりの事象のおこる割合 $Y = X/n$ を考えると、

$$\text{期待値は } \langle Y \rangle = \langle X \rangle / n = p \tag{2.1.1}$$

$$\text{分散は } V(Y) = V(X) / n^2 = \sigma^2 / n^2 = p(1 - p) / n \tag{2.1.2}$$

である。ここで、ベルヌーイ試行 $B(n, p)$ を行ったときに、 $p - \varepsilon < Y = X/n < p + \varepsilon$ となる確率を考える。まず、分散の定義から

$$\frac{\sigma^2}{n^2} = \int (y - p)^2 f(y) dy = \int_{p-\varepsilon}^{p+\varepsilon} (y - p)^2 f(y) dy + \int_0^{p-\varepsilon} (y - p)^2 f(y) dy + \int_{p+\varepsilon}^1 (y - p)^2 f(y) dy \tag{2.1.3}$$

$$\int_{p-\varepsilon}^{p+\varepsilon} (y - p)^2 f(y) dy \geq 0 \tag{2.1.4}$$

$$\int_0^{p-\varepsilon} (y - p)^2 f(y) dy + \int_{p+\varepsilon}^1 (y - p)^2 f(y) dy \geq \varepsilon^2 \left\{ \int_0^{p-\varepsilon} f(y) dy + \int_{p+\varepsilon}^1 f(y) dy \right\} = \varepsilon^2 P(|Y - p| \geq \varepsilon) \tag{2.1.5}$$

$$\therefore \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2 n^2} \geq P(|Y - p| \geq \varepsilon) \tag{2.1.6}$$

$$\text{一方 } 1 = P(|Y - p| \geq \varepsilon) + P(|Y - p| < \varepsilon) \tag{2.1.7}$$

であるので

$$P(|Y - p| < \varepsilon) \leq 1 - \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2 n^2} = 1 - \frac{p(1-p)}{\varepsilon^2 n} \tag{2.1.8}$$

どのような ε をとろうとも n を大きく ($n \gg 1/(\varepsilon^2)$) すると右辺は 1 に限りなく近づく。つまり、試行 1 回あたりの事象のおこる割合は、試行回数をおおきくすると、事象のおこる確率 p に近づいていく。

一般に、確率変数の期待値を $\langle X \rangle = \mu$ 、分散は σ^2 であるとき、分散の定義から

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \int (x - \mu)^2 f(x) dx = \int_{\mu-\varepsilon}^{\mu+\varepsilon} (x - \mu)^2 f(x) dx + \int_{-\infty}^{\mu-\varepsilon} (x - \mu)^2 f(x) dx + \int_{\mu+\varepsilon}^{+\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx \\ &\geq \int_{-\infty}^{\mu-\varepsilon} (x - \mu)^2 f(x) dx + \int_{\mu+\varepsilon}^{+\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx \geq \varepsilon^2 \left[\int_{-\infty}^{\mu-\varepsilon} f(x) dx + \int_{\mu+\varepsilon}^{+\infty} f(x) dx \right] \\ &= \varepsilon^2 P(|X - \mu| \geq \varepsilon) \end{aligned} \tag{2.1.9}$$

$$\therefore P(|X - \mu| \geq \varepsilon) \leq \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2} \tag{2.1.10}$$

これを Chebyshev's inequality という

確率の和の概念

$$1 = P(|X - \mu| \geq \varepsilon) + P(|X - \mu| < \varepsilon) \quad (2.1.7)$$

から

$$P(|X - \mu| < \varepsilon) \geq 1 - \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2} \quad (2.1.11)$$

となる。これは X が

$$\mu - \varepsilon < X < \mu + \varepsilon \quad (2.1.12)$$

となる確率を表している。

$\varepsilon = \sigma$ の時、 $P(|X - \mu| < \varepsilon) > 0$ で当たり前、

$\varepsilon = 2\sigma$ の時、 $P(|X - \mu| < \varepsilon) > 3/4$ と導くことができる。

2-5 確率変数の和

N回の独立な実験(試行)を行ったとき、おのこの観測値をあらわす確率変数を $X^{(i)}: i = 1 \dots N$ とする。また、それぞれの期待値と分散を

$$\langle X^{(i)} \rangle = \int x_i f^{(i)}(x_i) dx_i = \mu_i \quad (2.2.1)$$

$$\langle (X^{(i)} - \mu_i)^2 \rangle = \sigma_i^2: i = 1 \dots N \quad (2.2.2)$$

とする。

ここで、N回の観測値の和を考える

$$X(N) \equiv \sum_i X^{(i)} \quad (2.2.3)$$

$X(N)$ の期待値は、

$$\langle X(N) \rangle = \sum_i \langle X^{(i)} \rangle = \sum_i \mu_i \quad (2.2.4)$$

分散は

$$\begin{aligned} \langle (X(N) - \langle X(N) \rangle)^2 \rangle &= \left\langle \left(\sum_i (X^{(i)} - \mu_i) \right)^2 \right\rangle + \left\langle \left(\sum_i (X^{(i)} - \mu_i) \right) \left(\sum_j (X^{(j)} - \mu_j) \right) \right\rangle \\ &= \langle \sum_{i \neq j} (X^{(i)} - \mu_i)(X^{(j)} - \mu_j) \rangle + \langle \sum_i (X^{(i)} - \mu_i)^2 \rangle \end{aligned} \quad (2.2.5)$$

$$\text{また、} P(X^{(i)} = x_i, X^{(j)} = x_j) = f^{(i)}(x_i) f^{(j)}(x_j) \quad (2.2.6)$$

であるので、

$$\begin{aligned} \left\langle \sum_{i \neq j} (X^{(i)} - \mu_i)(X^{(j)} - \mu_j) \right\rangle &= \iint \sum_{i \neq j} (x - \mu_i)(y - \mu_j) f^{(i)}(x) f^{(j)}(y) dx dy \\ &= \sum_{i \neq j} \int (x - \mu_i) f^{(i)}(x) dx \int (y - \mu_j) f^{(j)}(y) dy = 0 \\ &(\because \sum_i \int (x - \mu_i) f^{(i)}(x) dx = 0) \quad \mu_i \text{の定義より} \end{aligned} \quad (2.2.7)$$

$$\begin{aligned} \therefore \langle (X(N) - \langle X(N) \rangle)^2 \rangle &= \langle \left(\sum_i (X^{(i)} - \mu_i) \right)^2 \rangle + 0 = \sum \sigma_i^2 \\ &(2.2.8) \end{aligned}$$

2-6 大数の法則

N回の独立な実験(試行)を行い、おのおの確率変数 $X^{(i)}: i = 1 \dots N$ が同じ確率分布(正規分布でなくて構わない)に従うとする。このときの期待値と分散を

$$\langle X^{(i)} \rangle = \mu \quad (2.3.1)$$

$$\langle (X^{(i)} - \mu)^2 \rangle = \sigma^2 \quad (2.3.2)$$

とする。ここで、N回の観測値の平均

$$\bar{X} \equiv \frac{X^{(N)}}{N} = \frac{1}{N} \sum X^{(i)} \quad (2.3.3)$$

を考えると、期待値と分散は

$$\langle \bar{X} \rangle = \frac{1}{N} \sum \langle X^{(i)} \rangle = \mu \quad (2.3.4)$$

$$\langle (\bar{X} - \mu)^2 \rangle = \frac{1}{N^2} \sum \sigma^2 = \frac{\sigma^2}{N} \quad (2.3.5)$$

ここで、チェビシェフの不等式をつかうと、

$$P(|\bar{X} - \mu| < \varepsilon) \leq 1 - \frac{\sigma^2}{N\varepsilon^2} \quad (2.3.6)$$

つまり、 $N \rightarrow \infty$ のとき、 \bar{X} は限りなく μ に近づく。測定回数を多くするほど真の値に近い結果を得ることができる。

2-7 中心極限定理

N回の独立な実験(試行)を行い、おのこの確率変数 $X^{(i)}: i = 1 \dots N$ が同じ確率分布(正規分布でなくて構わない)に従うとする。このときの期待値と分散を

$$\langle X^{(i)} \rangle = \mu \quad (2.3.1)$$

$$\langle (X^{(i)} - \mu)^2 \rangle = \sigma^2 \quad (2.3.2)$$

とする。ここで、標本平均の確率分布 \bar{X} はNが大きくなるにつれて期待値 μ 、分散 $\frac{\sigma^2}{N}$ の正規分布に近づく。

$$\bar{Z} \equiv \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{N}} \quad (2.4.1)$$

を定義すると、期待値0、分散1になる。(2.3.4)、(2.3.5)より。)

また、確率変数 $X^{(i)}$ に対して、

$$Z^{(i)} \equiv \frac{X^{(i)} - \mu}{\sigma} \quad (2.4.2)$$

を定義すると、これも期待値0、分散1になり、 \bar{Z} は

$$\bar{Z} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum Z^{(i)} \quad (2.4.3)$$

となる。

ここで、 \bar{Z} に対する特性関数を考えると

$$\Phi(i\xi) = \langle \exp(i\xi \bar{Z}) \rangle = \langle \prod \exp(i\xi \frac{Z^{(i)}}{\sqrt{N}}) \rangle = \prod \langle \exp(i\xi \frac{Z^{(i)}}{\sqrt{N}}) \rangle = \prod \Phi^{(i)}(i\xi) = (\Phi^{(i)}(i\xi))^N \quad (2.4.4)$$

ここで $\Phi^{(i)}(i\xi)$ は、 $Z^{(i)}/\sqrt{N}$ に対する特性関数であるので、 ξ の2次迄の近似で

$$\Phi^{(i)}(i\xi) = \exp \left[\frac{i\xi}{\sqrt{N}} \langle Z^{(i)} \rangle + \frac{1}{2} \left(\frac{i\xi}{\sqrt{N}} \right)^2 V(Z^{(i)}) + O \left(\left(\frac{i\xi}{\sqrt{N}} \right)^3 \right) \right] \quad (2.4.5)$$

と展開できる。 $Z^{(i)}$ の期待値0、分散1であるので、

$$\langle (Z^{(i)})^1 \rangle = 0, \langle (Z^{(i)})^2 \rangle = 1 \quad (2.4.6)$$

である。従って、

$$\Phi^{(i)}(i\xi) = \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{i\xi}{\sqrt{N}} \right)^2 + O \left(\left(\frac{i\xi}{\sqrt{N}} \right)^3 \right) \right] \quad (2.4.7)$$

よって、

$$\Phi(i\xi) = \exp \left[\frac{1}{2} (i\xi)^2 + N \times O \left(\left(\frac{i\xi}{\sqrt{N}} \right)^3 \right) \right] \quad (2.4.8)$$

$N \rightarrow \infty$ の極限をとると、

$$\Phi(i\xi) \rightarrow \exp\left[\frac{1}{2}(i\xi)^2\right] \quad (2.4.9)$$

これは、期待値 0、分散 1 の正規分布の特性関数と一致する
すなわち、

同じ確率分布に従う N ケの独立な確率変数 $X^{(i)}: i = 1 \dots N$ から

$$\bar{Z} \equiv \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma/\sqrt{N}} \quad (2.4.10)$$

をつくると、 \bar{Z} の分布は $N \rightarrow \infty$ の極限で期待値 0、分散 1 の正規分布となる

2-5 正規分布の性質

○確率変数の和

独立な確率変数 $X^{(i)}$: $i = 1 \dots N$ は、(それぞれ別の) 正規分布に従うとする。これらの確率変数の和

$$X(N) \equiv \sum_i X^{(i)} \quad (2.5.1)$$

を考える。

 $X(N)$ の特性関数は、

$$\Phi(\xi) = \langle \exp(i\xi X(N)) \rangle = \langle \exp(i\xi \sum_i X^{(i)}) \rangle = \iint \dots \int \exp(i\xi \sum_i x_i) f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (2.5.2)$$

確率変数は独立で、 $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod f_i(x_i)$ であるから、

$$\begin{aligned} \Phi(\xi) &= \prod \int \exp(i\xi x_i) f_i(x_i) dx_i = \prod \langle \exp(i\xi X^{(i)}) \rangle = \prod \exp \left[i\xi \mu_i + (i\xi)^2 \frac{\sigma_i^2}{2} \right] \\ &= \exp \left[i\xi \sum \mu_i + (i\xi)^2 \sum \frac{\sigma_i^2}{2} \right] \end{aligned} \quad (2.5.3)$$

これから、 $X(N)$ も正規分布であり、

$$\langle X(N) \rangle = \frac{\partial}{\partial (i\xi)} \Phi(\xi) \Big|_{\xi=0} = \sum \mu_i \quad (2.5.4)$$

$$\langle (X(N))^2 \rangle = \frac{\partial^2}{\partial (i\xi)^2} \Phi(\xi) \Big|_{\xi=0} = (\sum \mu_i)^2 + \sum \sigma_i^2 \quad (2.5.5)$$

$$V(X(N)) = \langle (X(N))^2 \rangle - (\langle X(N) \rangle)^2 = \sum \sigma_i^2 \quad (2.5.6)$$

であることが判る。

○確率変数の平均

独立な確率変数 $X^{(i)}$: $i = 1 \dots N$ は、同一の正規分布に従うとする。これらの確率変数の平均

$$\bar{X} \equiv \frac{1}{N} \sum_i X^{(i)} \quad (2.5.7)$$

を考える。特性関数は

$$\Phi_{\bar{X}}(\xi) = \exp \left[i\xi \sum \frac{\mu_i}{N} + (i\xi)^2 \sum \frac{\sigma_i^2}{2N^2} \right] = \exp \left[i\xi \mu + (i\xi)^2 \frac{\sigma^2}{2N} \right] \quad (2.5.8)$$

となり、

$$\langle \bar{X} \rangle = \mu \quad (2.5.9)$$

$$V(\bar{X}) = \frac{\sigma^2}{N} \quad (2.5.10)$$

の正規分布となる。

*

<<第2講ここまで>>

第 2 講に関連した例題

例題 2-1) 確率分布

二項分布 $Bi(10,0.6)$ と $Bi(20,0.3)$ の期待値と分散の比較し、論ぜよ。 $Bi(20,0.3)$ と $Bi(20,0.7)$ の期待値と分散を比較、論ぜよ。

(解答例)

図 1.5.1 参照。 $Bi(10,0.6)$ と $Bi(20,0.3)$ は期待値が等しい。 $Bi(20,0.3)$ と $Bi(20,0.7)$ では分散は等しい。期待値は 6 と 14 で、確率分布関数は 10 で対称になる。

例題 2-2) 確率

紅茶を先に注いだミルクティーとミルクを先に注いだミルクティーを、飲んだだけで言い当てられるという人がいる。まぐれで言い当てられるという確率を $1/1000$ の確率にするためには、どうしたらよいか。

(解答例) 合計 N 杯のミルクティーを用意して、ランダムに並べる。この時、紅茶を先に注いだミルクティーとミルクを先に注いだミルクティーを同数用意する。まぐれですべて当てられる確率は、 $\left(\frac{1}{2}\right)^N$ であるので、 $\left(\frac{1}{2}\right)^N < 1/1000$ となるような N を求めればよい。

$$2^N > 1000 \quad \text{両辺の対数をとって、} N \log 2 > 1000 \quad \text{よって、} N > \frac{3}{\log 2} = 9.96 \quad \text{よって}$$

紅茶を先に注いだミルクティーを 5 杯とミルクを先に注いだミルクティーを 5 杯用意して、ランダムな順番に並べ、当ててもらおう。

例題 2-3) 確率分布

ポアソン分布、正規分布の表式を書き、式中に表れるパラメータの物理的意味を書きなさい。それぞれについて、典型的な形を図に表し、図中にパラメータを表示しなさい。

(解答例)

図 1.6.1 図 1.7.1 参照

例題 2-2) 正規分布において、 $\pm 1\sigma$ の範囲には全体のどれだけが含まれるか。全体の 95% を含むためには、 μ からどれだけの領域をとる必要があるか。表 1.7.1 を参考に答えよ。

(解答例)

表 1.7.1 の左の表より、 1σ の外側に 0.317 があることが読み取れる。 $1-0.317=0.683$

表 1.7.1 の右の表より、0.05 をあたえるのは 1.96σ であることが読み取れる。

例題 2-4) 放射線測定を行って、100 事象計測された。この時の計数値に対する標準偏差はいくつだと見積もられるか。事象数に対する標準偏差の相対値(相対的な統計誤差)を求めよ。相対的な統計誤差を 1% に抑えるためには何事象以上の測定が必要だと考えられるか。

(解答例)

得られる分布はポアソン分布の μ が大きいものだと考えられる。

$$\sigma = \sqrt{\mu} = \sqrt{N} = \sqrt{100} = 10 \quad \text{標準偏差}=10 \quad \text{相対値 } 10/100=10\%$$

$$\frac{\sigma}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}} = 0.01 \quad N = 10000 \text{ 事象以上必要}$$

例題 2-5) 統計をあまり知らない友人が、「確率の低いくじを多数回引いて期待値を 1 にしたけれども、一度もあたりが出なかった。あのくじおかしい。」と言っていた。統計的にどう説明するか。

(解答例) ポアソン分布で期待値 $\mu=1$ の場合でも 0 となる可能性が $1/e$ ある。

例題 2-6) 確率の低いくじを多数回引いて期待値を 1 にしたときに、5 回以上あたりの出る確率はどれだけか。

(解答例) 確率の低いくじを多数引いた場合の結果はポアソン分布となる。あたりの出る確率について、0 回から 4 回までを足して 1 から引けばよい。

$$1 - \sum_{x=0}^4 \frac{1^x}{x!} e^{-1} = 1 - \frac{1}{e} \left(1 + 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{6} + \frac{1}{24} \right) = 0.0036$$

<<第 3 講>>

3 標本・母集団・推定・検定

3-1 標本と母集団

母集団 (population) とは、統計学的推定で基本として仮定する、ある要素の集合であって、これからランダムな標本を抽出して観察し、その結果から逆に母集団を推定するという形で用いる。

標本 (sample) とは、母集団の部分集合のこと。この母集団から部分集合を対応させる規則 (可測関数) を標本抽出 (sampling) と呼ぶ、

母集団を表現する数値を母数 (またはパラメータ) というのに対し、標本を表現する数値を統計量 (statistics) という。統計量は標本から算出される数値である。また統計量で特に母数を推定するために用いられるものを推定量という。

母集団を完全に調査するのは不可能な場合、標本から母集団の特性を推定する必要がある。この標本抽出には作為抽出法と無作為抽出法 (random sampling) の 2 つの抽出方法があり、統計学では無作為抽出法だけを議論する。

無作為抽出法：母集団のどの要素も等しい確率で標本に選ばれる。

また統計学的推定 (標本から母集団の性質を推定する) を行うには、各標本に対し、それが選ばれる確率を知る必要がある。このために様々な標本抽出法が開発されており、例えば異なる標本が選ばれる確率がすべて同じならば、その抽出法は単純ランダム (無作為) 抽出という。

母集団から N ケの標本を抽出する

$$x^{(i)}: i = 1 \dots N \quad (3.1.1)$$

標本を特徴づける標本平均値 (sample mean value) を導入する

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum x^{(i)} \quad (3.1.2)$$

次に、標本平均値のまわりのバラツキをあらわす標本分散値 (sample variance value) を導入する

$$v^2 = \frac{1}{N} \sum (x^{(i)} - \bar{x})^2 \quad (3.1.3)$$

この標本分散値の平方

$$v = \sqrt{v^2} \quad (3.1.4)$$

を、標本標準偏差という

3-2 標本確率変数

N 個の標本 $x^{(i)}: i = 1 \dots N$ を独立な確率変数 $X^{(i)}: i = 1 \dots N$ の実現値だと考える。標本は同じ母集団から抽出されたのだから、これら N 個の確率変数は同一の確率分布に従う。

すなわち、

「大きな母集団から $x^{(i)}: i = 1 \dots N$ という標本を抽出することは、母集団と同じ確率的な構造を持った互いに独立な確率変数 $X^{(i)}: i = 1 \dots N$ の実現値が $x^{(i)}: i = 1 \dots N$ で与えられた事と等価である」
また、互いに独立で同一の確率分布に従うものを、i.i.d.(independent identically distributed)な確率変数という。

これらの標本確率変数から統計量として、標本平均 (sample mean)

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_i X^{(i)} \quad (3.2.1)$$

及び標本分散 (sample variance)

$$V^2 = \frac{1}{N} \sum (X^{(i)} - \bar{X})^2 \quad (3.2.2)$$

標本標準偏差

$$V = \sqrt{V^2} \quad (3.2.3)$$

を導入する。(これらも確率変数である)

注目している確率変数の母集団に関する期待値を母平均 μ 、その分散を母分散 σ^2 という。

○標本平均及び標本分散と、母平均、母分散との関係

$$\langle \bar{X} \rangle = \frac{1}{N} \sum_i \langle X^{(i)} \rangle = \frac{1}{N} \sum_i \mu = \mu \quad (3.2.4)$$

$$\begin{aligned} \langle V^2 \rangle &= \frac{1}{N} \sum \langle (X^{(i)} - \bar{X})^2 \rangle \\ &= \frac{1}{N} \sum \langle \{(X^{(i)} - \mu) - (\bar{X} - \mu)\}^2 \rangle \\ &= \frac{1}{N} \sum \langle (X^{(i)} - \mu)^2 \rangle + \frac{1}{N} \sum \langle (\bar{X} - \mu)^2 \rangle - \frac{2}{N} \sum \langle (X^{(i)} - \mu)(\bar{X} - \mu) \rangle \end{aligned} \quad (3.2.5)$$

$$\frac{1}{N} \sum \langle (X^{(i)} - \mu)^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum \sigma^2 = \sigma^2 \quad (3.2.6)$$

$$\frac{1}{N} \sum \langle (\bar{X} - \mu)^2 \rangle = \langle (\bar{X} - \mu)^2 \rangle = \frac{\sigma^2}{N} \quad (3.2.7)$$

$$\frac{2}{N} \sum \langle (X^{(i)} - \mu)(\bar{X} - \mu) \rangle = 2 \left\langle \left\{ \frac{1}{N} \sum (X^{(i)} - \mu) \right\} (\bar{X} - \mu) \right\rangle = 2 \langle (\bar{X} - \mu)^2 \rangle = 2 \frac{\sigma^2}{N} \quad (3.2.7)$$

$$\therefore \langle V^2 \rangle = \frac{N-1}{N} \sigma^2 \quad (3.2.8)$$

そこで不偏分散(unbiased variance)

$$S^2 \equiv \frac{N}{N-1} V^2 = \frac{1}{N-1} \sum (X^{(i)} - \bar{X})^2 \quad (3.2.9)$$

を導入すると、

$$\langle S^2 \rangle = \sigma^2 \quad (3.2.10)$$

となる。

**

3-3 推定

○統計的推定

標本抽出によって得られたデータを基に、母集団の情報を得る操作を統計的推計 (statistical estimation) という。

このとき、母集団分布を仮定し、分布を特徴づける母数 (パラメータ) をデータから決定するやり方を、パラメトリックモデルによる推定法という。

例えば、母集団を正規分布だと仮定したときに、分布を特徴づけるパラメータは平均 μ と分散 σ^2 である。また、母集団をポアソン分布だと仮定したときのパラメータは平均 μ である。

○点推定

母数を θ とする。抽出されたデータを用いて θ を決定する手続きを点推定 (point estimation) という。まず、母数 θ に対応する確率変数 Θ をさがす。例えば、平均 μ という母数に対応する確率変数としては標本平均が Θ となる。この Θ は確率変数 $X^{(i)}: i = 1 \dots N$ の関数であり、

$$\Theta = \Theta(X^{(i)})$$

Θ を統計推定量 (statistical estimator) 又は推定量 (estimator) と呼ぶ。特に

$$\langle \Theta \rangle = \theta$$

となる Θ を不偏推定量 (unbiased estimator) と呼ぶ。

そこで、標本から計算される不偏推定量の実現値を、母数として推定する。

例：母集団分布が正規分布だと仮定した場合、

$$\text{標本平均} \quad \bar{X} = \frac{1}{N} \sum_i X^{(i)} \quad (3.3.1)$$

$$\text{不偏分散} \quad S^2 = \frac{1}{N-1} \sum (X^{(i)} - \bar{X})^2 \quad (3.3.2)$$

が、それぞれ平均 μ と分散 σ^2 の不偏推定量である。

そこで、母集団から抽出された N ケの標本を $x^{(i)}: i = 1 \dots N$ から計算される

$$\text{標本平均値} \quad \bar{x} = \frac{1}{N} \sum x^{(i)} \quad (3.3.3)$$

$$\text{標本分散値} \quad v^2 = \frac{1}{N} \sum (x^{(i)} - \bar{x})^2 \quad (3.3.4)$$

を、それぞれ母平均 μ と母分散 σ^2 として推定する。

標本平均値が母集団の平均と等しいわけではない、推定しただけである。ただし、大数の法則から、標本数 N が大きければ、標本平均値が母集団の平均に限りなく近づくことが言える。

3-4 区間推定① μ の推定 (付表参照) (検定 (4章) も参照)

点推定で推定したパラメータのバラツキや信頼区間を示すことを区間推定(interval estimation)という。

信頼水準(confidence level) $P(\theta_l \leq \theta \leq \theta_u) = 1 - \alpha$

危険値 α ($0 \leq \alpha \leq 1$)

と定める。「 $1 - \alpha$ の確かさで、母数は $\theta_l \leq \theta \leq \theta_u$ の範囲にある」という形式になる。 θ_l, θ_u を信頼限界 (confidence limit) と呼ぶ。

N 件の標本 $x^{(i)}: i = 1 \dots N$ を独立な確率変数 $X^{(i)}: i = 1 \dots N$ の実現値である。統計推定量 $\Theta = \Theta(X^{(i)})$ の分布を母数 θ と共に考える。

○母平均の μ の区間推定 (正規分布・母分散 σ^2 既知)

母集団は正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ であり、母分散 σ^2 が既知であるとする。

母平均 μ に対する推定量は標本平均 $\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_i X^{(i)}$ であり、

標本平均は正規分布 $N(\mu, \sigma^2/N)$ に従う。(中心極限定理)

そこで、

$$\bar{Z} \equiv \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{N}} \quad (3.4.1)$$

を考えると、これは正規分布 $N(0,1)$ に従うのであるから、

$$P(z_l \leq \bar{Z} \leq z_u) = \int_{z_l}^{z_u} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz = 1 - \alpha \quad (3.4.2)$$

となるように、 z_l, z_u を決定する。正規分布 $N(0,1)$ に対しては、 $z_l = -z_u$ であるから、

$$P\left(\bar{X} - \frac{\sigma}{\sqrt{N}} z_u \leq \mu \leq \bar{X} + \frac{\sigma}{\sqrt{N}} z_u\right) = 1 - \alpha \quad (3.4.3)$$

である。

一般には、99%の信頼度 ($1 - \alpha = 0.99$)、95%の信頼度 ($1 - \alpha = 0.95$) や90%の信頼度 ($1 - \alpha = 0.90$) がよく使われる。この時の信頼限界の値は表 1.7.1 の通り。

$$99\% \text{の信頼度 } (1 - \alpha = 0.99) \quad z_u = 2.58 \quad (3.4.5)$$

$$95\% \text{の信頼度 } (1 - \alpha = 0.95) \quad z_u = 1.96 \quad (3.4.6)$$

$$90\% \text{の信頼度 } (1 - \alpha = 0.90) \quad z_u = 1.64 \quad (3.4.7)$$

$$99.7\% \text{の信頼度 } (1 - \alpha = 0.997) \quad z_u = 3. \quad (3.4.8)$$

$$95\% \text{の信頼度 } (1 - \alpha = 0.90) \quad z_u = 2. \quad (3.4.9)$$

$$68\% \text{の信頼度 } (1 - \alpha = 0.68) \quad z_u = 1. \quad (3.4.10)$$

となる。(表 1.7.1 参照)

○母平均の μ の区間推定 (正規分布・母分散 σ^2 が未知の場合)

母平均 μ に対する推定量は標本平均 $\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_i X^{(i)}$

標本平均は正規分布 $N(\mu, \sigma^2/N)$ に従う。

しかし、母分散 σ^2 が未知なので、 \bar{Z} が定義できない。

そこで、母分散 σ^2 の不偏推定量である不偏分散 $S^2 = \frac{1}{N-1} \sum (X^{(i)} - \bar{X})^2$ を使って

$$T \equiv \frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{N}} \quad (3.4.11)$$

を考えてみると、これは自由度 $N-1$ の t -分布 (スチューデント分布) に従うことが判っている。

ここで、自由度 $N-1$ の t -分布の確率密度関数は

$$T(t, N-1) = \frac{\Gamma(\frac{N}{2})}{\sqrt{\pi(N-1)} \Gamma(\frac{N-1}{2})} \frac{1}{(\frac{t^2}{N})^{\frac{N}{2}}} \quad (3.4.12)$$

で与えられる。($N \rightarrow \infty$ で正規分布)

ここで Γ 関数は

$$\Gamma(\lambda) = \int_0^\infty x^{\lambda-1} \exp(-x) dx \quad (3.4.13) \quad *$$

定義され、

$$\Gamma(\lambda + 1) = \lambda \Gamma(\lambda)$$

$$\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \sqrt{\pi} \quad (3.4.14)$$

であることより

$$\Gamma\left(\frac{N}{2}\right) = \begin{cases} (n-1)! & N = 2n \\ \sqrt{\pi} \left(\frac{1}{2}\right)^n \prod_{i=0}^{n-1} (2i+1) & N = 2n+1 \end{cases} \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (3.4.15)$$

信頼限界の値は、自由度 N に依存し

	$N=10$	$N=100$
99%の信頼度 ($1 - \alpha = 0.99$)	$z_u = 3.25$	$z_u = 2.63$
95%の信頼度 ($1 - \alpha = 0.95$)	$z_u = 2.26$	$z_u = 1.98$
90%の信頼度 ($1 - \alpha = 0.90$)	$z_u = 1.83$	$z_u = 1.66$

となる。

○母平均の μ の区間推定 (Poisson 分布) (表 3.5.1, 3.5.2 参照)

母集団が Poisson 分布に従っているとす。

測定で n ケの事象が観測されたとき、推定によって μ の上限値を見積もる。Poisson 分布の関数

$$\frac{\mu^n}{n!} e^{-\mu} \equiv P(n, \mu) \quad (2.2.3)$$

を用いて、

$$P(\mu \leq \mu_u) = \int_0^{\mu_u} \frac{y^n}{n!} e^{-y} dy = 1 - \alpha \quad (3.4.16)$$

となる μ_u を求めればよい。

観測事象 n に対しての上限値 μ_u を表 3.4.1 に示す。

表 3.4.1 には同様に考えて求めた上限値 μ_l も示してある。

観測事象数 n に対しての上限値と下限値は (両側を合わせて α を考える) 付表 3.4.2 に示す。

特に、測定で $n=0$ の時には電卓での計算も可能で、

$$P(0, \mu) = e^{-\mu} \quad (3.4.17)$$

であるから

$$P(\mu \leq \mu_u) = \int_0^{\mu_u} \exp(-y) dy = 1 - \exp(-\mu_u) = 1 - \alpha \quad (3.4.18)$$

となるようにすればよい。

つまり、 $\mu_u = -\ln(\alpha)$

信頼度 90% の上限値 ($1 - \alpha = 0.9$) $\mu_u = \ln(10) = 2.30$

信頼度 95% の上限値 ($1 - \alpha = 0.95$) $\mu_u = \ln(20) = 3.00$

信頼度 99% の上限値 ($1 - \alpha = 0.99$) $\mu_u = \ln(100) = 4.60$

計算と表 3.4.1 は一致する。

Table 33.3: Lower and upper (one-sided) limits for the mean ν of a Poisson variable given n observed events in the absence of background, for confidence levels of 90% and 95%.

n	$1 - \alpha = 90\%$		$1 - \alpha = 95\%$	
	ν_{lo}	ν_{up}	ν_{lo}	ν_{up}
0	–	2.30	–	3.00
1	0.105	3.89	0.051	4.74
2	0.532	5.32	0.355	6.30
3	1.10	6.68	0.818	7.75
4	1.74	7.99	1.37	9.15
5	2.43	9.27	1.97	10.51
6	3.15	10.53	2.61	11.84
7	3.89	11.77	3.29	13.15
8	4.66	12.99	3.98	14.43
9	5.43	14.21	4.70	15.71
10	6.22	15.41	5.43	16.96

表 3.4.1 n 事象観測された際のポアソン分布の期待値 ν の上限値もしくは下限値。(片側検定)

2011 Review of Particle Physics (J. Phys. G **37**, 075021 (2010))

http://pdg.lbl.gov/2011/reviews/contents_sports.html

Table 33.4: Unified confidence intervals $[\nu_1, \nu_2]$ for a the mean of a Poisson variable given n observed events in the absence of background, for confidence levels of 90% and 95%.

n	$1 - \alpha = 90\%$		$1 - \alpha = 95\%$	
	ν_1	ν_2	ν_1	ν_2
0	0.00	2.44	0.00	3.09
1	0.11	4.36	0.05	5.14
2	0.53	5.91	0.36	6.72
3	1.10	7.42	0.82	8.25
4	1.47	8.60	1.37	9.76
5	1.84	9.99	1.84	11.26
6	2.21	11.47	2.21	12.75
7	3.56	12.53	2.58	13.81
8	3.96	13.99	2.94	15.29
9	4.36	15.30	4.36	16.77
10	5.50	16.50	4.75	17.82

表 3.4.2 n 事象観測された際のポアソン分布の期待値 ν の上限値および下限値。(両側検定)

2011 Review of Particle Physics (J. Phys. G **37**, 075021 (2010))

http://pdg.lbl.gov/2011/reviews/contents_sports.html

3-5 区間推定② 母分散 σ の推定

母平均 μ に対する推定では、母分散 σ^2 が既知である、もしくは不偏分散を用いた。母分散の値について、区間推定を行う。不偏分散 S について、

$$\frac{N-1}{\sigma^2} S^2 = \frac{1}{\sigma^2} \sum (x^{(i)} - \bar{x})^2 \tag{3.5.1}$$

は、自由度 $N-1$ の χ^2 分布に従うことが判っている

ここで、自由度 N の χ^2 分布の確率密度関数は

$$C(y, N) = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{N}{2}} \frac{1}{\Gamma(\frac{N}{2})} y^{\frac{N}{2}-1} \exp(-\frac{y}{2}) \tag{3.5.2}$$

で与えられる。

自由度 N の χ^2 分布に従う確率変数 Y の期待値と分散は

$$\langle Y \rangle = \int_0^\infty y C(y, N) dy = \frac{2}{\Gamma(\frac{N}{2})} \int_0^\infty x^{\frac{N}{2}} \exp(-x) dx = \frac{2\Gamma(\frac{N}{2}+1)}{\Gamma(\frac{N}{2})} = N \tag{3.5.3}$$

$$\langle Y^2 \rangle = \int_0^\infty y^2 C(y, N) dy = \frac{4}{\Gamma(\frac{N}{2})} \int_0^\infty x^{\frac{N}{2}+1} \exp(-x) dx = \frac{4\Gamma(\frac{N}{2}+2)}{\Gamma(\frac{N}{2})} = N(N+2) \tag{3.5.4}$$

$$\langle Y^2 \rangle - \langle Y \rangle^2 = 2N \tag{3.4.5}$$

そこで、reduced χ^2

$$\tilde{S} \equiv \frac{S}{N-1} \tag{3.4.6}$$

を定義すると、

$$\langle \tilde{S} \rangle = 1 \tag{3.4.7}$$

$$\langle \tilde{S}^2 \rangle - \langle \tilde{S} \rangle^2 = \frac{2}{N-1} \tag{3.4.8}$$

よって、reduced χ^2 が 1 に近いことを確認すればよい。

このとき、信頼度 α での reduced χ^2 の値、つまり

$$\int_{S_1}^\infty C(y, N) dy = 1 - \frac{\alpha}{2} \tag{3.4.9}$$

$$\int_0^{S_2} C(y, N) dy = 1 - \frac{\alpha}{2} \tag{3.4.10} **$$

となる S_1, S_2 の値は下表のとおりである

自由度 N	信頼度 $\alpha = 90\%$		信頼度 $\alpha = 99\%$	
	S_1	S_2	S_1	S_2
1	0	3.84	0	7.88
5	0.23	2.20	0.08	3.35
10	0.39	1.83	0.22	2.52
50	0.69	1.44	0.54	1.59
100	0.78	1.24	0.67	1.40

目的は引き続き「母数の推定」

3-6 最尤法

母集団の確率密度関数を母数 θ に依存することを明示して $W(x) = W(x, \theta)$ と書く。

N 個の標本 $x^{(i)}: i = 1 \dots N$ を独立な確率変数 $X^{(i)}: i = 1 \dots N$ の実現値だから、母数 θ に対して N 個の標本値 $x^{(i)}: i = 1 \dots N$ が実現する確率を

$$L(\theta) \equiv W(x^{(1)}, \theta) W(x^{(2)}, \theta) \dots W(x^{(N)}, \theta) = \prod W(x^{(i)}, \theta) \quad (3.6.1)$$

を尤度関数 (likelihood function) として定義する。

確率の高い状態ほど起こりやすいのだから、 $L(\theta)$ が最大となるように母数 θ を決めればよい。これを最尤法 (maximum likelihood method) といい、このようにして決めた値を $\hat{\theta}$ とかいて最尤推定値 (maximum likelihood estimate) と呼ぶ。

実際の手順としては、尤度関数の対数(対数尤度)

$$l(\theta) \equiv \ln(L(\theta)) = \sum \ln(W(x^{(i)}, \theta)) \quad (3.6.2)$$

を最大になるように、つまり

$$\left. \frac{d}{d\theta} l(\theta) \right|_{\theta=\hat{\theta}} = 0 \quad (3.6.3)$$

となるように $\hat{\theta}$ を決定する。

例：母集団分布が正規分布だと仮定した場合、母数は平均 μ と分散 σ^2 であるから、確率密度関数は

$$W(x, \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.6.4)$$

対数尤度は

$$l(\mu, \sigma^2) = \sum \ln\left(W(x^{(i)}, \mu, \sigma^2)\right) = -\frac{1}{2\sigma^2} \sum (x^{(i)} - \mu)^2 - \frac{N}{2} \ln(2\pi\sigma^2) \quad (3.6.5)$$

最大になる条件は

$$0 = \frac{\partial}{\partial \mu} l(\mu, \sigma^2) = -\frac{1}{\sigma^2} \sum (x^{(i)} - \mu) \quad (3.6.6)$$

$$0 = \frac{\partial}{\partial (\sigma^2)} l(\mu, \sigma^2) = \frac{1}{2(\sigma^2)^2} \sum (x^{(i)} - \mu)^2 - \frac{N}{2\sigma^2} \quad (3.6.7)$$

よって、

$$\hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum x^{(i)} = \bar{x} \quad (3.6.8)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N} \sum (x^{(i)} - \mu)^2 = v^2 \quad (3.6.9)$$

となる。

**

3-7 最小二乗法

物理現象の測定データには、誤差が含まれ、それは系統誤差と偶然誤差を含んでいる。このうち、偶然誤差は、測定における信号経路の微視的現象に由来するならば、正規分布になる(白色雑音である)と期待されることが多い。測定データがモデル関数と白色雑音の和で表わせるならば、測定データとモデル関数の差の分散を最小にするようにモデル関数を決定することができる。

パラメータ $t = t^{(i)}: i = 1 \dots N$ で規定される N 個の測定点での測定値を $x^{(i)}: i = 1 \dots N$ とする。

測定値が、未知のパラメータ θ を含むモデル関数 $f(t, \theta)$ と、正規分布に従う誤差(分散 $\sigma_i^2: i = 1 \dots N$) の和であるとする。すると、 $x^{(i)}: i = 1 \dots N$ は、正規分布 $N(f(t^{(i)}, \theta), \sigma_i^2)$ に従う独立な確率変数 $X^{(i)}: i = 1 \dots N$ の実現値と考えることができ、最尤法を適応してパラメータ θ を決定する。

確率密度関数は

$$W(x, t, \theta, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-f(t, \theta))^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.7.1)$$

対数尤度を最大にする条件は

$$0 = \frac{\partial}{\partial \theta} l(\theta) = \frac{\partial}{\partial \theta} \sum \ln(W(x^{(i)}, t^{(i)}, \theta, \sigma_i^2)) = -\frac{\partial}{\partial \theta} \sum \frac{1}{2\sigma_i^2} (x^{(i)} - f(t^{(i)}, \theta))^2 \quad (3.7.2)$$

つまり

$$\chi^2 = \sum \frac{1}{\sigma_i^2} (x^{(i)} - f(t^{(i)}, \theta))^2 > 0 \quad (3.7.3)$$

を最小にするようにパラメータ θ を決定する。

ここで χ^2 は、測定点の個数を N 、パラメータ θ の個数を m としたとき、自由度 $N-m$ の χ^2 分布に従うことが判っている

ここで、自由度 N の χ^2 分布の確率密度関数は

$$C(y, N) = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{N}{2}} \frac{1}{\Gamma(\frac{N}{2})} y^{\frac{N}{2}-1} \exp\left(-\frac{y}{2}\right) \quad (3.7.4)$$

で与えられる。

$$\text{ただし } \Gamma(\lambda) = \int_0^\infty x^{\lambda-1} e^{-x} dx \quad (3.7.5)$$

自由度 N の χ^2 分布に従う確率変数 Y の期待値と分散は

$$\langle Y \rangle = \int_0^\infty y C(y, N) dy = \frac{2}{\Gamma(\frac{N}{2})} \int_0^\infty x^{\frac{N}{2}} \exp(-x) dx = \frac{2\Gamma(\frac{N}{2}+1)}{\Gamma(\frac{N}{2})} = N \quad (3.7.6)$$

$$\langle Y^2 \rangle = \int_0^\infty y^2 C(y, N) dy = \frac{4}{\Gamma(\frac{N}{2})} \int_0^\infty x^{\frac{N}{2}+1} \exp(-x) dx = \frac{4\Gamma(\frac{N}{2}+2)}{\Gamma(\frac{N}{2})} = N(N+2) \quad (3.7.7)$$

$$\langle Y^2 \rangle - \langle Y \rangle^2 = 2N \quad (3.7.8)$$

そこで、reduced χ^2

$$\tilde{S} \equiv \frac{S}{N-m} \quad (3.7.9)$$

を定義すると、

$$\langle \tilde{S} \rangle = 1 \tag{3.7.10}$$

$$\langle \tilde{S}^2 \rangle - \langle \tilde{S} \rangle^2 = \frac{2}{N-m} \tag{3.7.11}$$

このとき、信頼度 $1-\alpha$ での reduced χ^2 の値、つまり

$$\int_{S_1}^{\infty} C(yN, N) dy = 1 - \frac{\alpha}{2} \tag{3.7.12}$$

$$\int_0^{S_2} C(yN, N) dy = 1 - \frac{\alpha}{2} \tag{3.7.13}$$

となる S_1, S_2 の値は表 3.6.1 のとおりである。

また、危険区域を片側のみにとった場合は

$$\int_{S_1}^{\infty} C(yN, N) dy = 1 - \alpha \tag{3.7.14}$$

となる。(表 3.7.2、図 3.7.1 参照)

自由度 N	信頼度 $1-\alpha=90\%$		信頼度 $1-\alpha=99\%$	
	S_1	S_2	S_1	S_2
1	0	3.84	0	7.88
5	0.23	2.20	0.08	3.35
10	0.39	1.83	0.22	2.52
50	0.69	1.44	0.54	1.59
100	0.78	1.24	0.67	1.40

表 3.7.1 自由度 N に対する reduced X^2 の値。 α を両側にとっている。

自由度 N	信頼度 $1-\alpha=90\%$	信頼度 $1-\alpha=95\%$	信頼度 $1-\alpha=99\%$
	S_1	S_1	S_1
1	2.71	3.84	6.63
5	1.84	2.20	5.03
10	1.60	1.83	2.32
50	1.26	1.35	1.52
100	1.19	1.24	1.35

表 3.7.2 自由度 N に対する reduced X^2 の値。 α を片側にとっている。

2011 Review of Particle Physics (J. Phys. G **37**, 075021 (2010))

http://pdg.lbl.gov/2011/reviews/contents_sports.html

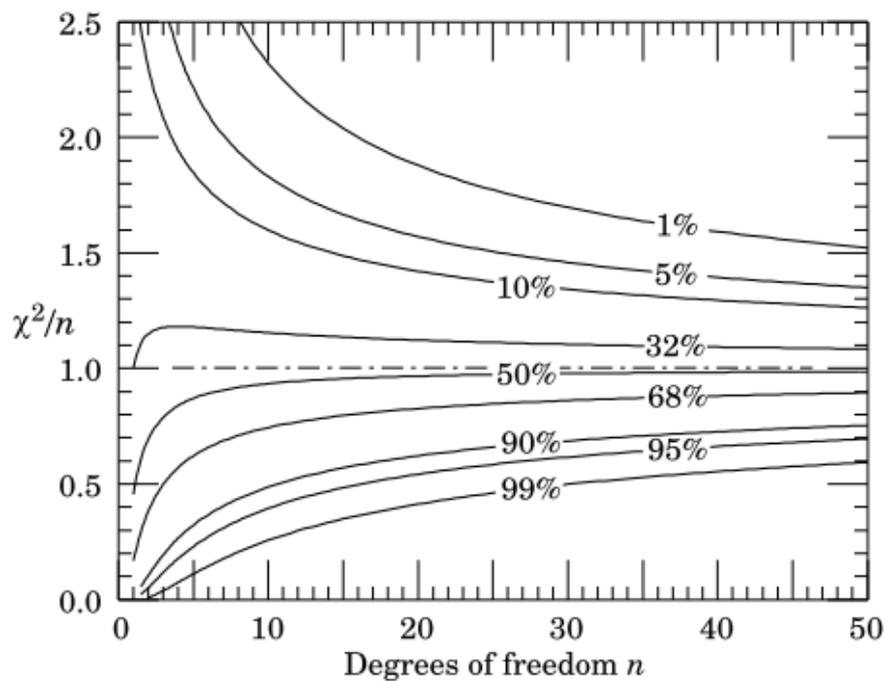


Figure 33.2: The ‘reduced’ χ^2 , equal to χ^2/n , for n degrees of freedom. The curves show as a function of n the χ^2/n that corresponds to a given p -value.

図 3.7.1 自由度 n に対する reduced X^2 の値。 α は片側にとっている。

2011 Review of Particle Physics (J. Phys. G **37**, 075021 (2010))

http://pdg.lbl.gov/2011/reviews/contents_sports.html

例：モデル関数を一次関数 $f(t, a, b) = at + b$ とする。

$$S(a, b) = \sum \frac{1}{\sigma_i^2} (x^{(i)} - at^{(i)} - b)^2 \quad (3.7.15)$$

最小になる条件は

$$0 = \frac{\partial}{\partial a} S(a, b) = \sum \frac{1}{\sigma_i^2} (x^{(i)} - at^{(i)} - b) t^{(i)} \quad (3.7.16)$$

$$0 = \frac{\partial}{\partial b} S(a, b) = \sum \frac{1}{\sigma_i^2} (x^{(i)} - at^{(i)} - b) \quad (3.7.17)$$

よって、

$$\begin{pmatrix} \sum \frac{x^{(i)} t^{(i)}}{\sigma_i^2} \\ \sum \frac{x^{(i)}}{\sigma_i^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum \frac{(t^{(i)})^2}{\sigma_i^2} & \sum \frac{t^{(i)}}{\sigma_i^2} \\ \sum \frac{t^{(i)}}{\sigma_i^2} & \sum \frac{1}{\sigma_i^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \quad (3.7.18)$$

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \frac{1}{D} \begin{pmatrix} \sum \frac{1}{\sigma_i^2} & -\sum \frac{t^{(i)}}{\sigma_i^2} \\ -\sum \frac{t^{(i)}}{\sigma_i^2} & \sum \frac{(t^{(i)})^2}{\sigma_i^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sum x^{(i)} t^{(i)} \\ \sum x^{(i)} \end{pmatrix} \quad (3.7.19)$$

$$D = \left(\sum \frac{(t^{(i)})^2}{\sigma_i^2} \right) \left(\sum \frac{1}{\sigma_i^2} \right) - \left(\sum \frac{t^{(i)}}{\sigma_i^2} \right)^2 \quad (3.7.20)$$

Nケの測定点での測定値を

$x^{(i)}: i = 1 \dots N$, 誤差分散 $\sigma_{xi}^2: i = 1 \dots N$)

及び

$y^{(i)}: i = 1 \dots N$, 誤差分散 $\sigma_{yi}^2: i = 1 \dots N$)

とする。

測定値の組み $(x \ y)$ の間に、未知のパラメータ θ を含むモデル関数 $f(x, \theta)$ を使って $y = f(x, \theta)$ という関係が成り立つものとする。

このとき、最小二乗法を使ってパラメータ θ を決定するには、

誤差の伝搬の式を使って、先の例で

$$\sigma_i^2 \rightarrow \sigma_{yi}^2 + \left(\frac{\partial f(x, \theta)}{\partial x} \Big|_{x=x_i} \right)^2 \sigma_{xi}^2 \quad (3.7.21)$$

の置き換えをすればよい。

例：モデル関数を一次関数 $f(t, a, b) = at + b$ とする。

$$S(a, b) = \sum \frac{1}{\sigma_i^2} (x^{(i)} - at^{(i)} - b)^2$$

これが最小になる点は

$$\begin{pmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{pmatrix} = \frac{1}{D} \begin{pmatrix} \sum \frac{1}{\sigma_i^2} & -\sum \frac{t^{(i)}}{\sigma_i^2} \\ -\sum \frac{t^{(i)}}{\sigma_i^2} & \sum \frac{(t^{(i)})^2}{\sigma_i^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sum x^{(i)} t^{(i)} \\ \sum x^{(i)} \end{pmatrix}, D = \left(\sum \frac{(t^{(i)})^2}{\sigma_i^2} \right) \left(\sum \frac{1}{\sigma_i^2} \right) - \left(\sum \frac{t^{(i)}}{\sigma_i^2} \right)^2$$

いま上記の点のまわりで S をテーラー展開して

$$\left. \frac{\partial S(a, b)}{\partial a} \right|_{(\hat{a}, \hat{b})} = 0, \left. \frac{\partial S(a, b)}{\partial b} \right|_{(\hat{a}, \hat{b})} = 0$$

であることに注意すると

$$S(a, b) \cong S(\hat{a}, \hat{b}) + \frac{(a - \hat{a})^2}{2} \left. \frac{\partial^2 S(a, b)}{\partial a^2} \right|_{(\hat{a}, \hat{b})} + \frac{(b - \hat{b})^2}{2} \left. \frac{\partial^2 S(a, b)}{\partial b^2} \right|_{(\hat{a}, \hat{b})} + (a - \hat{a})(b - \hat{b}) \left. \frac{\partial^2 S(a, b)}{\partial a \partial b} \right|_{(\hat{a}, \hat{b})}$$

$$S(a, b) \cong S(\hat{a}, \hat{b}) + (a - \hat{a} \quad b - \hat{b}) V \begin{pmatrix} a - \hat{a} \\ b - \hat{b} \end{pmatrix}$$

$$V = \begin{pmatrix} \left. \frac{1}{2} \frac{\partial^2 S(a, b)}{\partial a^2} \right|_{(\hat{a}, \hat{b})} & \left. \frac{1}{2} \frac{\partial^2 S(a, b)}{\partial a \partial b} \right|_{(\hat{a}, \hat{b})} \\ \left. \frac{1}{2} \frac{\partial^2 S(a, b)}{\partial a \partial b} \right|_{(\hat{a}, \hat{b})} & \left. \frac{1}{2} \frac{\partial^2 S(a, b)}{\partial b^2} \right|_{(\hat{a}, \hat{b})} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum \frac{(t^{(i)})^2}{\sigma_i^2} & \sum \frac{t^{(i)}}{\sigma_i^2} \\ \sum \frac{t^{(i)}}{\sigma_i^2} & \sum \frac{1}{\sigma_i^2} \end{pmatrix}$$

この逆行列が、誤差行列

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_a^2 & c_{ab} \\ c_{ab} & \sigma_b^2 \end{pmatrix} = \frac{1}{D} \begin{pmatrix} \sum \frac{1}{\sigma_i^2} & -\sum \frac{t^{(i)}}{\sigma_i^2} \\ -\sum \frac{t^{(i)}}{\sigma_i^2} & \sum \frac{(t^{(i)})^2}{\sigma_i^2} \end{pmatrix}$$

となる。

注意：各測定点の誤差が既知でないときも、最小自乗法は使用できる。但し、誤差行列は、

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_a^2 & c_{ab} \\ c_{ab} & \sigma_b^2 \end{pmatrix} = \frac{1}{D} \begin{pmatrix} \sum \frac{1}{\sigma_i^2} & -\sum \frac{t^{(i)}}{\sigma_i^2} \\ -\sum \frac{t^{(i)}}{\sigma_i^2} & \sum \frac{(t^{(i)})^2}{\sigma_i^2} \end{pmatrix} \frac{S(\hat{a}, \hat{b})}{N - m}$$

となる。

3-8 仮説と検定

母集団分布について前もってなされる仮定を統計的仮説(“hypothesis”)という。

統計的仮説が正しいかどうか調べる作業を統計的検定 (“test of hypothesis”) という。

検定とは、抽出された N 個の標本の値 $x^{(i)}: i = 1 \dots N$ を基にして、仮説 H_0 を棄却するかどうかを判断する作業。

同一の確率分布に従う N 個の確率変数 $X^{(i)}: i = 1 \dots N$ から決まる検定統計量 (“test statistics”)

$K(X^{(1)}, \dots, X^{(N)})$ を考え、仮説 H_0 を $H_0: \langle K \rangle = k_0$ と記す

仮説 H_0 が成り立つと仮定したときの検定統計量の確率分布を H_0 を $W(k: H_0)$ として、

$$\int_{R_0} W(k: H_0) dk = \alpha \quad (3.8.1)$$

となるように領域 R_0 を決める。この時 α を有意水準(“significance level”) または危険率という。

もし、 N 個の標本の値 $x^{(i)}: i = 1 \dots N$ から得られた値 $K(x^{(1)}, \dots, x^{(N)})$ が領域 R_0 に入ったら、

「危険率 α で仮説 H_0 は棄却された」

という。ここで危険率とは、

「仮説 H_0 が正しいにもかかわらず、棄却されてしまう確率」

のことである。

○片側検定：危険率 α の危険域を領域の片側にのみ設定する方法。

○両側検定：危険域を領域の両側に設定する検定法。危険率が合計で α となるようにする。

3-9 正規分布に従う母集団に対する検定(3-4 節参照)

i) 母分散 σ^2 が既知であるときの母平均 μ に対する検定

仮説 $H_0: \mu = \mu_0$ を信頼水準 $1 - \alpha$ で検定するには、

$$\bar{Z} \equiv \frac{\bar{x} - \mu_0}{\sigma / \sqrt{N}} \quad (3.9.1)$$

を検定統計量として両側検定で考える。 \bar{Z} は正規分布 $N(0, 1)$ に従う。

$$P(z_0 \leq z \leq \infty) = \int_{z_0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz = \frac{\alpha}{2} \quad (3.9.2)$$

となる z_0 を表 2.3.1 より求め、 z_0 と \bar{Z} を比較、 $z_0 > \bar{Z}$ であれば仮説は棄却されない。

ii) 母分散に対する検定 (3-5節参照)

仮説 $H_0: \sigma = \sigma_0$ を信頼水準 $1 - \alpha$ で検定するには、不偏分散 $S^2 = \frac{1}{N-1} \sum (X^{(i)} - \bar{X})^2$ を使って

$$\chi^2 \equiv \sum \frac{(X^{(i)} - \bar{X})^2}{\sigma^2} = (N-1) \frac{S^2}{\sigma^2} \quad (3.9.3)$$

を検定統計量として両側検定で考える。これは、自由度 $N-1$ のカイ 2 乗分布に従うので、

$$P(k_u \leq \chi^2 \leq \infty) = \frac{\alpha}{2} \quad (3.9.4)$$

および

$$P(0 \leq \chi^2 \leq k_l) = \frac{\alpha}{2} \quad (3.9.5)$$

となる k_l, k_u が χ^2 の棄却域となる。

iii) 母分散 σ^2 が未知であるときの母平均 μ に対する検定

仮説 $H_0: \mu = \mu_0$ を信頼水準 $1 - \alpha$ で検定するには、不偏分散 $S^2 = \frac{1}{N-1} \sum (X^{(i)} - \bar{X})^2$ を使って

$$T \equiv \frac{\bar{X} - \mu_0}{S/\sqrt{N}} \quad (3.9.6)$$

を検定統計量として両側検定で考える。 $S \cong \sigma$ とできるときにはi)と同じく正規分布を用いることができる。この時、 T は自由度 $N-1$ の student 分布に従う。

$$P(t_0 \leq T \leq \infty) = \frac{\alpha}{2} \quad (3.9.7)$$

となる t_0 を求める。

例) $\alpha=0.05$ とすると $t_0 = 2.26$ である。

$T(x^{(1)}, \dots, x^{(N)}) \geq t_0$ 又は $T(x^{(1)}, \dots, x^{(N)}) \leq -t_0$ ならば、仮説 H_0 は棄却される。

3-10 事前確率と事後確率

試行以前の確率分布 (事前確率) が、試行後の確率分布 (事後確率) に影響することがある。この時事前確率を仮定しなければ事後確率を決定することができない。

次の問題を考えてみよう

問)

狂牛病の検査試験の感度が

狂牛病に罹っている場合 ...	100.0% 陽性
狂牛病に罹っていない場合 ...	99.8% 陰性、0.2%陽性

であるとする。あなたの飼っている牛 1 頭の検査を行ったところ、陽性反応が出た。その牛が狂牛病に罹っている可能性は何%か。

答)

陽性反応が出たとしても、狂牛病に罹っていない可能性がある。

狂牛病に罹っている場合、陽性が出る可能性は 100%、

狂牛病に罹っていない場合、陽性が出る可能性は 0.2%。

よって、狂牛病に罹っている可能性は $\frac{100}{100+0.2} = 99.8\%$ であろう。

ところが、注意深く考えてみると、今の議論では、「検査前の時点における狂牛病に罹っている確率と罹っていない確率が 1 対 1 である」ことが暗黙のうちに仮定されている。

例えば、全国調査で、狂牛病に罹っている牛の割合が、10 万頭に対して 1 頭であることが分かっていた場合、陽性反応が出た牛が狂牛病に罹っている確率は

$$\frac{1 \times 100}{(1 \times 100) + (99999 \times 0.2)} \cong 0.5\%$$

である。

3-11 ベイズ原理 (Bayes' Principle)

観測前の確率分布 (事前確率) が、観測後の確率分布 (事後確率) に影響する。事前確率を仮定しなければ事後確率を決定することができない。

以下のような記法で議論を進める

確率変数 (random variable) : X, Y, Z, \dots

標本値 (sample value) または観測値 (observation value) : $x, y, z,$

真の値、母数 (parameter) : $\mu, \theta,$

確率密度関数 (Probability Density Function: p.d.f.) : $f(x), f(\mu)$

条件付き確率密度関数 (Conditional p.d.f.) $f(x|\mu), f(\mu|x)$

x, μ の同時密度関数 (joint density function) は (1.1.10) 式より

$$f(x, \mu) = f(x|\mu)f(\mu) = f(\mu|x)f(x) \tag{4.4.1}$$

と書ける。これから、

$$f(\mu|x) = \frac{f(x|\mu)f(\mu)}{f(x)} = \frac{f(x|\mu)f(\mu)}{\int f(x|\mu')f(\mu')d\mu'} \tag{4.4.2}$$

この式により、ここで、 $f(\mu)$ を事前確率 (prior probability) とすると、事前確率 $f(\mu)$ 、観測された確率 $f(x|\mu)$ から事後確率 (posterior probability) $f(\mu|x)$ が得られる。分母の値は規格化の為に必要。

- Bayes 原理を適用するには、事前確率が必要である。(Bayes 原理以外の推定方法では、事前確率は暗黙のうちに仮定されている)
- 事前確率の決め方については統一の見解はない。(統計学は事前確率の決定法については何も教えてくれない)

第3講に関連した例題

例題 3-1) 新粒子の探索実験を行ったところ、ある測定時間での反応数は0事象だった。90%の信頼区間での、真の反応数の期待値の上限値を求めよ。

解答例 ポアソン分布の表より 2.3 事象。

例題 3-2) 新粒子の探索実験を行ったところ、ある測定時間での反応数は5事象だった。真の反応数の期待値を95%の信頼度で求めよ。

解答例 ポアソン分布の表より 1.84~11.26 事象。

例題 3-3) 新粒子の探索実験を行ったところ、ある測定時間での反応数は1000事象だった。真の反応数の期待値を95%の信頼度で求めよ。

解答例 正規分布と考えることができる。標準偏差 $\sigma = 31.6$ 正規分布での90%信頼区間は $2.3\sigma = 73$ 1000 ± 73 事象。

例題 3-4) 正規分布

仮説 H_0 ではある測定での粒子の検出数の期待値が57事象である。一回の測定を行い、測定された事象数が50の時、信頼度95%でこの仮説を検定せよ。

解答例) $\bar{Z} \equiv \frac{\bar{X} - \mu_0}{\sigma/\sqrt{N}}$ について、 $\bar{X} = 50$, $\mu_0 = 57$, $\sigma = \sqrt{50}$, $N = 1$ を代入すると $-\bar{Z} = 0.98$

信頼度95%なので、表1.7.1の $\alpha = 0.05$ の項を見る。 $\delta = 1.96\sigma$

$1.96 > 0.98$ なので、仮説 H_0 は棄却されない。

例題 3-5) ポアソン分布

新種の素粒子の測定に成功した。観測数は5事象で、バックグラウンドイベントは無視できる程度であることが分かった。この素粒子が観測される確率が、生成断面積1fbあたり5事象となる実験条件であった時、生成断面積を信頼度90%で推定せよ。

解答例) 方針：観測された事象数 x から観測事象数の期待値 μ を推定する問題。

ポアソン分布をの上限(μ_u)、下限(μ_l)を表3.5.2から数字を拾う。

信頼度90% ($1 - \alpha = 0.9$)で観測事象数の期待値は $\mu_l = 1.8, \mu_u = 9.9$ より $\mu = 5_{-3.2}^{+4.9}$ である。

したがって、生成断面積は $1_{-0.6}^{+1.0}$ fb となる。

信頼度95% ($1 - \alpha = 0.95$)で観測事象数の期待値は $\mu_l = 1.8, \mu_u = 11.3$ より $\mu = 5_{-3.2}^{+6.3}$ である。

したがって、生成断面積は $1_{-0.6}^{+1.3}$ fb となる。

○事前確率の考えを取り入れた解。観測された事象数 x に対して生成個数の期待値 μ を推定しているのだが、 μ は0以上であることを考慮に入れ、事前確率

$$f(\mu) = \begin{cases} 0 & : \mu < 0 \\ 1 & : \mu \geq 0 \end{cases}$$

を導入する。ベイズの原理から

$$f(\mu|x) = \frac{f(x|\mu)f(\mu)}{f(x)} = \frac{f(x|\mu)f(\mu)}{\int_0^\infty f(x|\mu')f(\mu')d\mu'} = \frac{f(x|\mu)}{\int_0^\infty f(x|\mu')d\mu'} = f(x|\mu) = \frac{\mu^x}{x!} e^{-\mu} \quad (4.4.6)$$

$$\begin{aligned} E(f(\mu|x)) &= \int_0^\infty \mu f(\mu|x)d\mu = \int_0^\infty \mu \frac{\mu^x}{x!} e^{-\mu} d\mu = - \left[\frac{\mu^{x+1}}{x!} e^{-\mu} \right]_0^\infty + (x+1) \int_0^\infty \frac{\mu^x}{x!} e^{-\mu} d\mu \\ &= x+1 \int_0^\infty f(\mu|x)d\mu = x+1 \end{aligned} \quad (4.4.7)$$

よって、期待値は $x+1=6$ 事象となるようなポアソン分布を考える。

0次近似では生成断面積は $6 \pm \sqrt{6} = 6.0 \pm 2.4$ fb である。生成断面積の最頻値は 5.0 fb である。

ポアソン分布の表から、

信頼度 90%で 観測事象数の期待値は $\mu_l =$

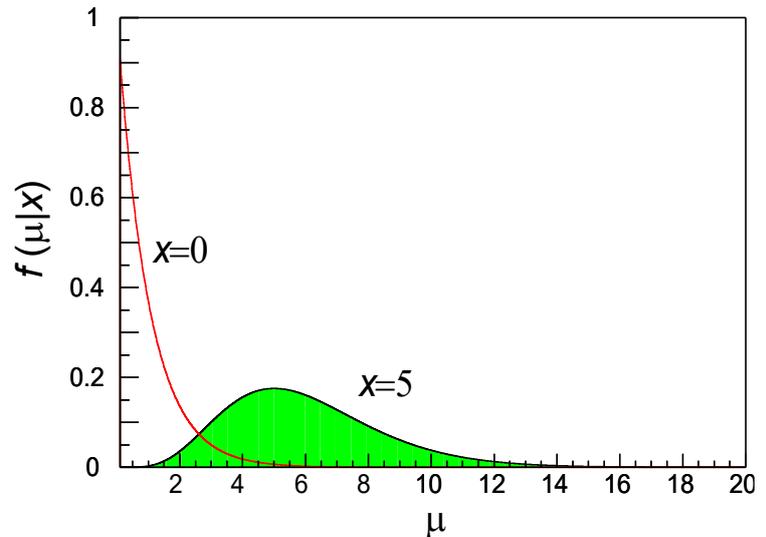
2.2, $\mu_u = 11.5$ $6.0 \pm_{-2.8}^{5.5}$ である。

したがって、生成断面積は $1.2 \pm_{-0.6}^{1.1}$ fb となる。

信頼度 95%で 観測事象数の期待値は $\mu_l =$

2.2, $\mu_u = 12.8$ $6.0 \pm_{-2.8}^{6.8}$ である。

したがって、生成断面積は $1.2 \pm_{-0.6}^{1.4}$ fb となる。



例題 3-6) 正規分布・ポアソン分布 (応用)

放射線源 A からの γ 線の、1 分間での検出数測定を 100 回行った結果、

$$\text{その(標本)平均 } \bar{x} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} x_i \text{ は } 24.0$$

$$\text{その(標本)不偏分散 } S^2 = \frac{1}{99} \sum_{i=1}^{100} (x_i - \bar{x})^2 \text{ は } 25.0$$

であった。

- (1) γ 線の検出効率 (検出効率 = 検出された γ 線の個数 ÷ 放出された γ 線の総数) が 10% であるとして、放射線源 A の強度 I (Bq: 1 秒間に放出する γ 線の個数) の範囲を 95% の信頼度で推定しなさい。(有効数字 3 桁) 但し、測定結果の平均値は正規分布に従い、その分散は標本不偏分散と等しいとする。
- (2) 放射線源 A と同じエネルギーの γ 線を放出する、別の放射線源 B がある。上記と同様の測定条件で測定したところ(つまり、検出効率は 10% で等しい)、10 分間の計数 (検出した γ 線の個数) が 0 であった。放射線源 B の強度の上限値を 95% の信頼度で推定しなさい。(有効数字 2 桁)

解答例

$$(1) Y = 24.0 \div 0.10 \div 60 = 4.00$$

$$(3.4.1) \text{より } \sqrt{\sigma_Y^2} = \sqrt{\frac{25}{100}} \div (0.10 \times 60) = \frac{5}{60} = 0.0833$$

両側 95%の信頼度なので、正規分布の表より 1.96σ をとる。

$$Y - 1.96 \times \sigma_Z < I < Y + 1.96 \times \sigma_Z$$

$$3.83 < I < 4.16 \quad [\text{Bq}]$$

(2)

上限値の推定なので、片側ポアソン分布を用いる。表 3.5.1 の $n=0$ を 95%についてみると、上限値は 3.0。従って、 $I' \leq 3.0 / (0.1 \times 10 \times 60) = 0.05$ [Bq]

(別解)

$$P(0) = e^{-\mu'} \geq 0.05$$

$$\therefore \mu' \leq -\ln 0.05 = \ln 20 = 2 \ln 2 + \ln 5 = 3.0$$

$$I' \leq \frac{3.0}{0.10 \times 10 \times 60} = 0.0500$$

例題 3-7) 検出器を 10 ケ並べて実験を行う。検出効率について、検出効率 0.2、 $\sigma = 0.05$ を要請値として検出器を製作した。実測した検出効率は 0.18, 0.14, 0.27, 0.22, 0.20, 0.18, 0.23, 0.24, 0.18, 0.26, 0.21 となった。

検出効率、 σ の値が 90%の信頼度で要請値を満たしているか検定せよ。ただし、検出効率の検定に対しては、 σ の値として不偏分散を用いてよい。

解答例) 検出効率について、実測の検出効率を $X_1 \cdots X_{10}$ とすると $\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{11} X_i = 0.21$

母分散が未知なので、不偏分散を使う。

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{10} (X_i - \bar{X})^2 = 0.0152/9 = 0.001688$$

中心極限定理より標本平均は $(\bar{X}, \sigma^2/N)$ の正規分布に従う。

$$\text{ここで } \bar{Z} = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{N}} = \frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{N}} = \frac{0.21 - 0.2}{0.013} = \frac{0.01}{0.012} = 0.83 < 1.64$$

なので検出効率は 90%信頼区間で要請値を満たしている。

σ について

不偏分散 S について、 $\chi^2 \equiv \frac{(N-1)S^2}{\sigma^2}$ が成り立つ。(3.5.1)式および(4.2.5)式

よって、reduced χ^2 を計算すると、 $\frac{\chi^2}{N-1} \equiv \frac{S^2}{\sigma^2} = \frac{0.001688}{0.05^2} = \frac{0.001688}{0.0025} = 0.67$ となる。

自由度 10 の χ^2 分布について、90%信頼区間は $S_1=0.39 < 0.67$ なので、90%信頼区間で σ は要請値を満たしている。

例題 3-8) γ 線の計測を1分間行ったところ、100事象観測された。統計誤差はどれだけか。1%の統計誤差で観測するためには、どれだけの時間観測する必要があるか?

同じ検出器で中性子の測定を行ったところ、1分間での観測数は0事象だった。1分あたりの測定値についての上限值は90%の信頼度で何事象となるか。10分の測定を行ったところ1事象観測された。下限値と上限値を求め、1分間の測定と矛盾があるかないか議論せよ。

(解答例) 統計誤差 10事象(もしくは10%)

1%の統計誤差を得るためには、 $\sigma = 1/\sqrt{N}$ より 10000事象必要なので、100分

上限値のみを求めるので、ポアソン分布の片側検定を使う。0事象、90%信頼度で2.3事象。

ポアソン分布の両側検定を使う。1事象、90%なので、0.11~4.36事象となる。1分あたりに焼直すと0.011~0.436事象。1分間の測定では、上限値2.3のみしか得られていないので矛盾はない。

<基礎概念>

期待値 $E(X) = \int x \cdot f(x) dx$

分散 $V(X) = E[\{X - E(X)\}^2] = E[X^2] - (E(X))^2$

<確率分布>

ポアソン分布 $P(x, \mu) \equiv \frac{\mu^x}{x!} e^{-\mu}$ 期待値 = μ 分散 = μ

正規分布 $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2})$ 期待値 = μ 分散 = σ^2

<使用例>

- * μ を知っている時にある測定値 x を得る確率：確率分布関数から計算
- * ポアソン分布の延長としての正規分布では 分散 = $\mu = N$ と考えられる。

性質

大数の法則 $P(|\bar{X} - \mu| < \varepsilon) \leq 1 - \frac{\sigma^2}{N\varepsilon^2}$: 測定回数を重ねると平均値は真の期待値に近づく。

中心極限定理 : N 回の試行で、 \bar{X} は 期待値 μ 、分散 $\frac{\sigma^2}{N}$ の正規分布に近づく

<母数推定>

最尤法 : $(\theta) \equiv W(x^{(1)}, \theta)W(x^{(2)}, \theta) \dots W(x^{(N)}, \theta) = \prod W(x^{(i)}, \theta)$ を最大にする。

最小二乗法 : $S = \sum \frac{1}{\sigma_i^2} (x^{(i)} - f(t^{(i)}, \theta))^2$ を最小にする

S は自由度 $N - m$ の χ^2 分布に従う

<最終目的：母数推定・検定>

標本平均 $\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_i X^{(i)}$ $\Rightarrow \mu \sim \bar{X}$

不偏分散 $S^2 = \frac{1}{N-1} \sum (X^{(i)} - \bar{X})^2$ $\Rightarrow \sigma \sim S/\sqrt{N}$

信頼度 σ 既知 (もしくは S で代用) μ を求める \Rightarrow 正規分布
 σ を求める $\Rightarrow \chi^2$ 分布

<<第 4 講>>

4 電気回路

4-1 アナログ回路

4-1-1 回路素子

・抵抗 (R)

$$V = RI \quad (4.1.1)$$

単位：Ω (オーム)

通常使用は 50~1MΩ 程度

温度係数：温度によって抵抗値が変わってしまう。温度補償、

種類：炭素 金属皮膜 セメント ⇒ 定格電力、温度係数の違い

表示：abcdであれば図 5.2 のカラーコードを参照して、

$$(10 \cdot a + b) \times 10^c \Omega \quad (4.1.2)$$

である。(dは抵抗値の精度)

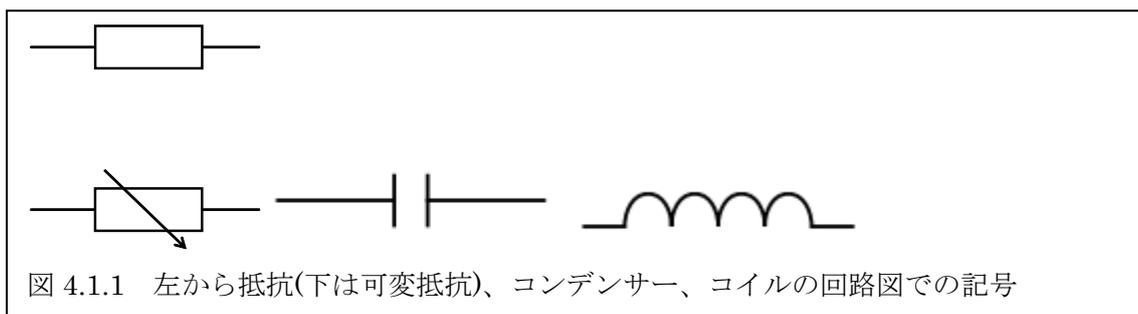


図 4.1.1 左から抵抗(下は可変抵抗)、コンデンサー、コイルの回路図での記号

$10 \times 10^2 = 1000$
1kΩ 誤差±10%の抵抗

数値	色	覚え方	数値	色	覚え方
0	黒	黒い礼(0)服	5	緑	五月ミドリ
1	茶	小林(1)茶	6	青	徳川無声(六声)
2	赤	赤い(2)んじん	7	紫	紫式(七)部
3	橙	み(3)かんはタイタイ	8	灰	ハイヤー(8)
4	黄	四季(黄)の色	9	白	ホワイトケ(9)リスマス

図 4.1.2 有効桁数 2 桁の抵抗値の読み方の例(左)とカラーコードの覚え方例。

(http://www.jarl.or.jp/Japanese/7_Technical/lib1/teikou.htm)

・コンデンサー (C)

単位：F(ファラッド)

$$Q = CV \quad (4.1.3)$$

通常使用は 1pF~100 μ F 程度

表示： abc であれば

$$(10 \cdot a + b) \times 10^c \text{ pF} \quad (4.1.4)$$

$$104 \text{ ならば } (10 \cdot a + b) \times 10^4 \text{ pF} = 10 \times 10^{4-12} \text{ F} = 0.1 \times 10^{-6} \text{ F} = 0.1 \text{ }\mu\text{F}$$

通常 n(ナノ)は使わず、p(ピコ)もしくは μ (マイクロ)で表す。

種類：セラミック、フィルム、電界、タンタル \Rightarrow 周波数特性、容量で選択

・コイル (L)

単位：H(ヘンリー)

$$V = L \frac{di}{dt} \quad (4.1.5)$$

表示： abc であれば

$$(10 \cdot a + b) \times 10^c \text{ }\mu\text{H} \quad (4.1.6)$$

・ケーブル

定格電流に注意。

大電流を流す時には、電圧降下に注意。

・電源

直流、交流

電圧源と電流源

通常の DC 電源は低電圧を供給

・グラウンド (GND)

あまり意識しないが、複数の装置で基準電圧が等しいことは重要

ノイズを落とす時には重要

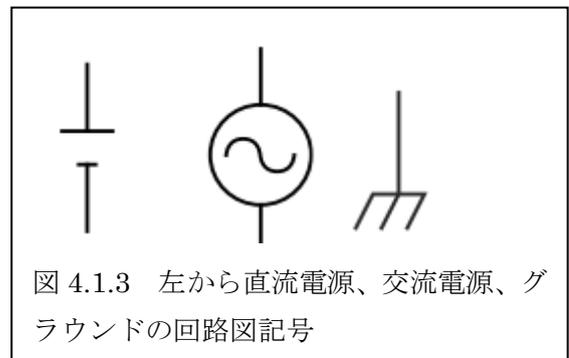


図 4.1.3 左から直流電源、交流電源、グラウンドの回路図記号

4-1-2 LCR 回路

- ・インピーダンス Z : 周波数依存を考慮した「抵抗」

$$V_0 \equiv Z I_0 \quad (4.1.7)$$

- ・抵抗

$$Z = R \quad (4.1.8)$$

- ・コンデンサー

(5.1.3) より

$$I = C \frac{dV}{dt} \quad (4.1.9)$$

電圧が時間変化すると

$$V(t) = V_0 \cos(\omega t) \quad (4.1.10)$$

$$I(t) = C \frac{dV}{dt} = -C\omega V_0 \sin(\omega t) = -I_0 \sin(\omega t) \quad (4.1.11)$$

位相を無視して振幅のみ考えると

$$C\omega V_0 = I_0 \quad (4.1.12)$$

$$Z = \frac{1}{\omega C} \quad (4.1.13)$$

となる。

複素数を用いて考えると位相まで考えることができ

$$Z = \frac{1}{i\omega C} \quad (4.1.14)$$

となる。

- ・コイル

(4.1.5)式から、コンデンサーと同様に考えて

$$Z = i\omega L \quad (4.1.15)$$

直感的には、抵抗は周波数依存なし。コンデンサーは高周波ほどよく通し、コイルはその逆。

・フィルター

抵抗とコンデンサーを組み合わせることで、高（低）周波の信号のみを選択的に取り出すことができる。

高（低）周波の信号の選択的に透過させる回路をハイ（ロー）パスフィルターと呼ぶ。ノイズの中から興味のある信号を取得するために重要。

図 4.4 の回路を考える。インピーダンスを合成して、出力電圧を計算する。

上の回路図では、

$$V_{out} = V_{in} \frac{R}{(1/i\omega C)+R} = V_{in} \frac{1}{(1+i\omega CR)+1} \quad (4.1.16)$$

下の回路図では、

$$V_{out} = V_{in} \frac{1/i\omega C}{(1/i\omega C)+R} = V_{in} \frac{1}{(1+i\omega CR)} \quad (4.1.17)$$

となり、右に示すような周波数特性を示す。

ハイ（ロー）パスフィルターは微分（積分）回路とも呼ばれる。

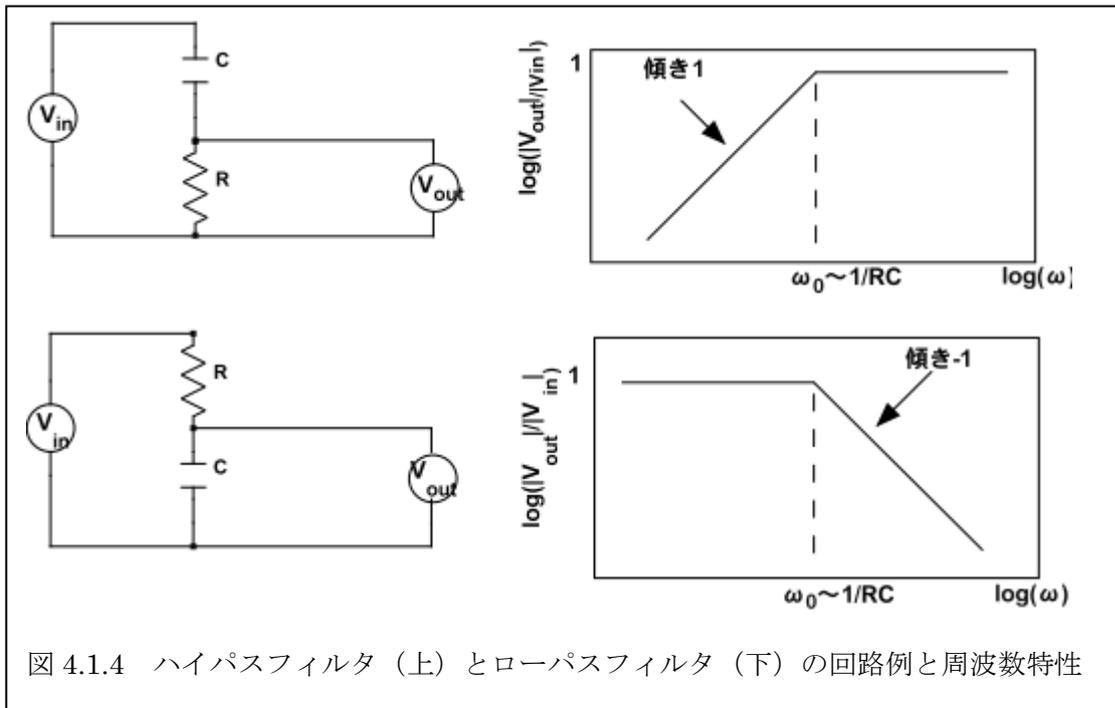


図 4.1.4 ハイパスフィルタ（上）とローパスフィルタ（下）の回路例と周波数特性

4-1-3 ダイオード、トランジスタ、オペアンプ(詳細は物理学実験 I 「増幅器」で)

- 半導体の性質を使って、電圧、電流を制御するための回路。
- 半導体
絶縁体と導体の中間の電気抵抗を持つ物質。不純物を添加することで抵抗値を制御可能。
電荷のキャリアが電子の物を n 型半導体、ホールの物を p 型半導体と呼ぶ。
- ダイオード
p 型半導体と n 型半導体を組み合わせることで、一方方向のみ電流を流すことのできる素子。
- トランジスタ
半導体を組み合わせて電流を制御可能とした素子。
電流で制御するバイポーラトランジスタと電圧で制御する FET がある。
- オペアンプ
回路素子を集積して、入力電圧を増幅する機能を持たせたもの。

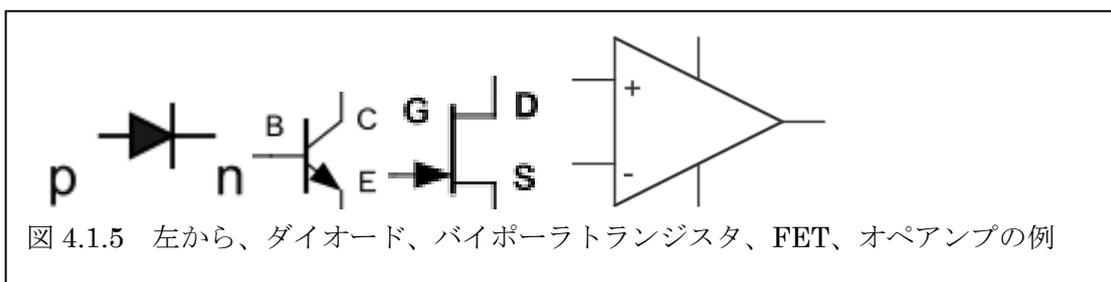


図 4.1.5 左から、ダイオード、バイポーラトランジスタ、FET、オペアンプの例

4-1-4 伝送線

・信号線の LCR により、高周波（数 MHz 以上）の信号を伝送するのは容易ではない。裸線で伝送しようとするとう電波となって空間に逃げてしまう。

・これを防ぐために同軸ケーブルを用いる。

同軸ケーブルでは、キャパシタンス及びインダクタンスが

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(b/a)} \quad (4.1.18)$$

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln(b/a) \quad (4.1.19)$$

となる。ここで、 a は芯線の半径、 b は外部導体の内径、 ϵ と μ は絶縁体の誘電率と透磁率である。理想的な同軸ケーブルでは、

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4.1.20)$$

となる。

同軸ケーブルではこれらを用いて減衰定数 α と位相定数 β が以下の様に求められる。

$$\alpha = \frac{1}{2}(R\sqrt{C/L} + G\sqrt{L/C}) \quad (4.1.21)$$

$$\beta = \omega\sqrt{LC} \quad (4.1.22)$$

ここで、 G はキャパシタンスに並列に入る抵抗値の逆数である。

・粒子実験などで高周波を扱う場合にはインピーダンス 50Ω の同軸ケーブルを用いる。終端抵抗を 50Ω とすることで反射を防ぐ。



図 4.1.6 同軸ケーブルの例

4-2 デジタル回路

デジタル回路：信号を二値化し、高速処理を可能とした回路。

論理値、論理記号、論理演算の例を図 4.2.1 に示す。

4-2-1 アナログ⇄デジタル変換

物理量はアナログ コンピュータのデータはデジタル : アナログ→デジタル変換 (ADC : analog to digital converter)

コンピュータから装置の制御 : DAC

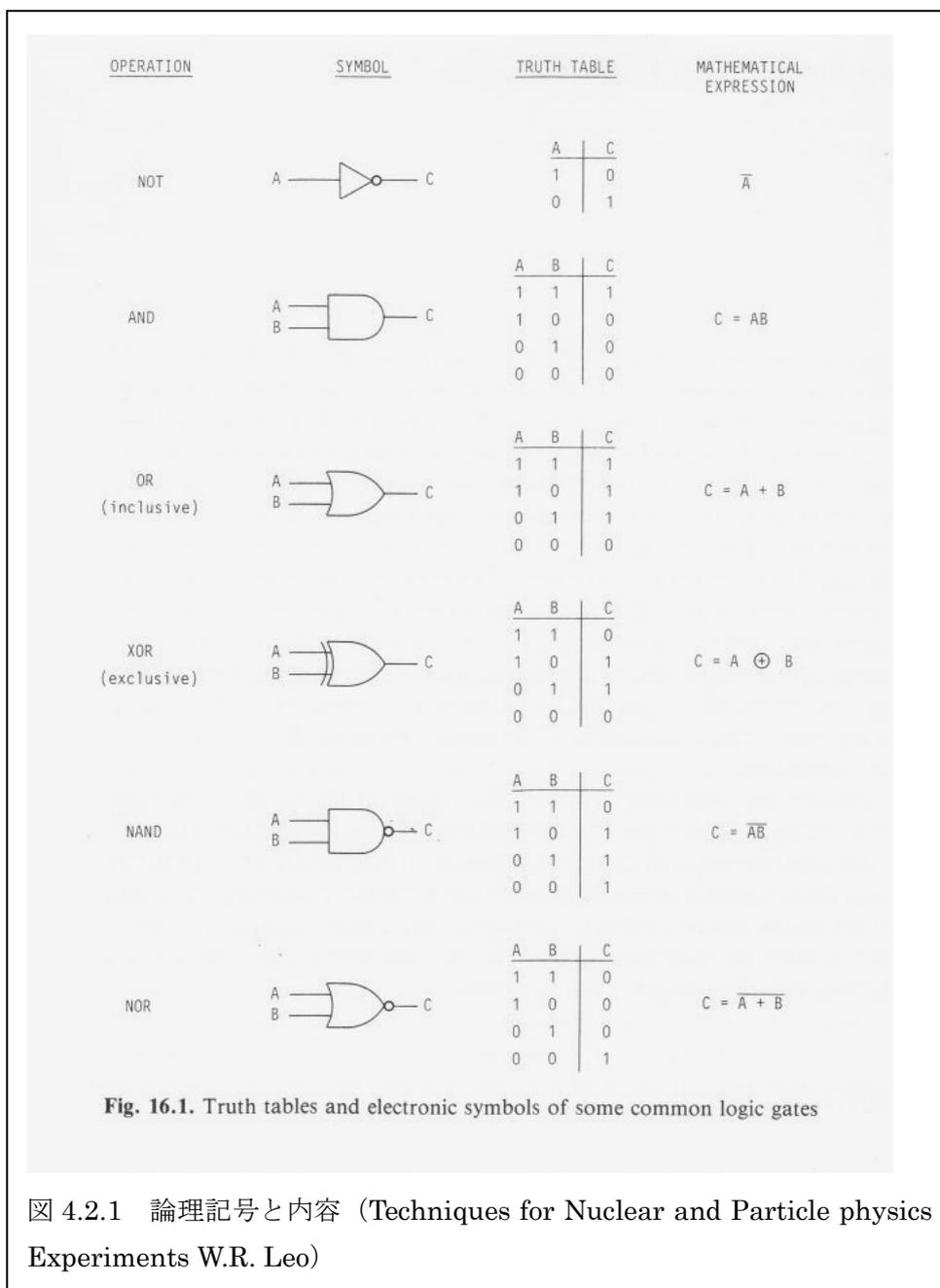


図 4.2.1 論理記号と内容 (Techniques for Nuclear and Particle physics Experiments W.R. Leo)

第四講に関連した例題

例題 4-1) 次の抵抗、コンデンサの値を読み取れ

抵抗(以下のカラーバー) 茶黒黒金 茶黒茶金 茶黒赤金 茶黒橙金

コンデンサー (コンデンサー表面に以下の表記) 1 3 10 33 101 331 102 103 104

解答例 10Ω 100Ω 1kΩ 10kΩ

1pF 3pF 10pF 33pF 100pF 330pF 1000pF 10⁴pF 10⁵pF=0.1μF

例題 4-2) 次の抵抗、コンデンサで作られるフィルターの時定数を求めよ

1kΩ 10pF

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi 10^3 \times 10^{-11}} = \frac{10}{2\pi} \times 10^4 = 1.6 \times 10^7 [\text{Hz}] = 16 [\text{MHz}]$$

<<第5講>>

5 粒子物理基礎

5.1 粒子物理入門

5.1.1 素粒子と宇宙

未発見の粒子の探索・既知の粒子の精密測定
を通じて

宇宙は何からできているのか、どのような法則にしたがっているのか。 に迫る。

5.1.2 自然単位系

・次元 すべての物理パラメータはM(質量)L(長さ)T(時間)I(電流)の次元の組み合わせで表現可能。

例) 速度[LT⁻¹] 運動量[MLT⁻¹] エネルギー[ML²T⁻²] プランク定数[ML²T⁻¹]

・基本定数

光速 $c=2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$

素電荷 $e=1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$

プランク定数 $h=6.62 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

・粒子の質量は、その静止エネルギーと関連している。→ 粒子の質量をエネルギーで表現。
エネルギーを eV(電子が 1V の電位差で得るエネルギー = $1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$)で表現する。

例) 陽子の質量 $m_p = 1.672 \times 10^{-27} \text{ kg}$

$$\begin{aligned} m_p c^2 &= 1.672 \times 10^{-27} \times (3 \times 10^8)^2 [\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}] = 1.672 \times 9 \times 10^{-11} [\text{J}] \\ &= \frac{1.672 \times 9 \times 10^{-11}}{1.602 \times 10^{-19}} [\text{eV}] = 0.938 [\text{GeV}] \end{aligned} \quad (5.1.1)$$

中性子の質量 $m_n c^2 = 0.940 \text{ GeV}$ (5.1.2)

電子の質量 $m_e = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$ $m_e c^2 = 511 [\text{keV}]$ (5.1.3)

・運動量に速度を掛けたものはエネルギーの次元 ⇒ 運動量もエネルギーで表現。

・プランク定数 h を 2π で割った \hbar を使って長さもエネルギーで表現することができる。

$$\begin{aligned} \hbar &\equiv \frac{h}{2\pi} = 1.054 \times 10^{-34} [\text{J}\cdot\text{s}] \\ &= \frac{1.054 \times 10^{-34}}{1.602 \times 10^{-19}} [\text{eV}] = 6.582 \times 10^{-22} [\text{MeV}\cdot\text{s}] = 6.582 \times 10^{-22} \text{ MeV}\cdot\text{s} \end{aligned} \quad (5.1.4)$$

$$\hbar c = 6.582 \times 10^{-22} \times 3 \times 10^8 \text{ MeV}\cdot\text{s}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1} = 197.3 \text{ MeV}\cdot\text{fm} \quad (5.1.5)$$

さまざまな物理パラメータを c と \hbar で次元を合わせて、 $c = \hbar = 1$ となる単位系を考え、エネルギーとして表現する。 ⇒ 「自然単位系」

$$\text{質量 } Mc^2/c^2 \quad 1\text{MeV} \quad (5.1.6)$$

$$\text{長さ } \hbar c/(Mc^2) \quad 1\text{MeV}^{-1} = 197.3\text{fm} \quad (5.1.7)$$

$$\text{時間 } \hbar c / (Mc^3) \quad 1\text{MeV}^{-1} = 6.6 \times 10^{-22}\text{s} \quad (5.1.8)$$

5.1.3 微細構造定数

電荷のクーロン相互作用による大きさを表す無次元のパラメータ

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = \frac{1}{137} \quad (5.1.8)$$

$$\epsilon_0 \equiv \frac{1}{\mu_0 c^2} \text{は真空の誘電率} \quad \mu_0 \equiv 4\pi \times 10^{-7} [\text{NA}^{-2}]$$

5.1.4 プランクスケール

重たい物質からの脱出速度は(6.1.9)式の様にあらわされる。

$$\frac{1}{2}mv^2 = G \frac{mM}{R} \quad (5.1.9)$$

ここで、光も脱出できない状況を考えて

$$R_s = \frac{2mG}{c^2} \quad (5.1.10)$$

を得る。

一方、質量 m の粒子の波長は

$$\lambda_c = \frac{\hbar}{mc} \quad (5.1.11)$$

ここで、量子論的な効果が重要になる距離を(5.1.12)式の条件で定義する。

$$\frac{\lambda_c}{2\pi} = \frac{R_s}{2} \quad (5.1.12)$$

式(5.1.12)に R_s と λ_c を代入して、質量についてとくと、プランク質量 M_{pl} を得ることができる。

$$M_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \quad (5.1.13)$$

プランク質量に対応したプランクエネルギー $1.22 \times 10^{19}\text{GeV}$ 、プランク長 $1.6 \times 10^{-35}\text{m}$ を得る。

5.2 相対論初歩

5.2.1 相対論

相対性原理：全ての自然法則は、あらゆる慣性系において同一。

慣性系：一定の速度で運動する系

自然法則を記述する方程式は、異なる慣性基準系の座標と時間とを使って書いても、すべて同じ形になる。

光速一定の原理：真空中の光速は、相互作用の最大伝搬速度であり、すべての慣性基準系において同一

$$c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (5.2.1)$$

その結果 速度の加算則は成り立たなくなる

5.2.2 相対論的運動量、エネルギー(導出、詳細は相対論の講義で)

相対論で以下が成り立つ

・定義

$$\beta = \frac{v}{c} \quad (5.2.2)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (5.2.3)$$

・ローレンツ変換(x 方向に v で運動している'系への変換)

$$x' = \gamma(x - \beta ct) \quad (5.2.4)$$

$$y' = y \quad (5.2.5)$$

$$z' = z \quad (5.2.6)$$

$$ct' = \gamma(ct - \beta x) \quad (5.2.7)$$

・運動量、エネルギー

$$p = m v \gamma \quad (5.2.8)$$

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \quad (5.2.9)$$

$$T = E - mc^2 \quad (5.2.10)$$

E : 粒子の全エネルギー、 T : 運動エネルギー

$$E = \gamma mc^2 \quad (5.2.11)$$

$$m^* = \gamma m \quad (5.2.12)$$

5.3 重心系座標

粒子の散乱・崩壊・生成などを考えるときに使う
重心系に対しては運動量の総和が0になる
(2体の場合運動方向が一直線上になる。)

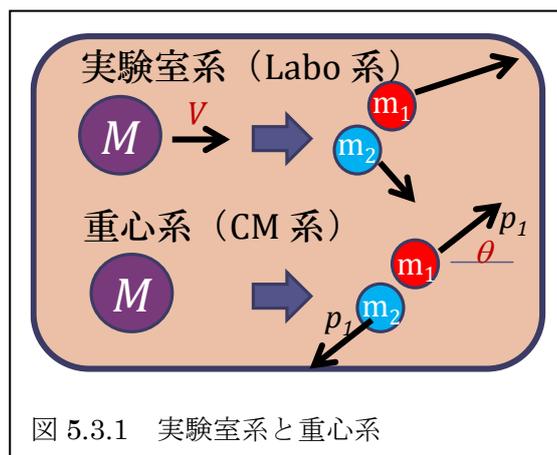


図 5.3.1 実験室系と重心系

<<第6講>>

6.1 粒子と物質の相互作用

6.1.1 粒子の種類

- 素粒子と複合粒子

現在の物理の理解：素粒子と標準模型

実際の現象：素粒子がいくつか組み合わせられたものが見えていることもある。

- 粒子を特徴づけるパラメータ

電荷（荷電粒子と中性粒子） 質量



図 6.1.1 標準模型の素粒子

名前	記号	質量	電荷
陽子	P	938MeV	+1
中性子	N	940MeV	0
電子	e^-	511keV	-1
陽電子	e^+	511keV	+1
μ 粒子	μ^\pm	106MeV	± 1
光子	γ	0	0

表 6.1.1 学生実験で出てくる粒子

6.1.2 荷電粒子と物質の相互作用

荷電粒子が物質中を通過すると、物質中の電子と荷電粒子間のクーロン力によって電子が原子から電離され、荷電粒子のエネルギーの一部が電離した電子に与えられる。

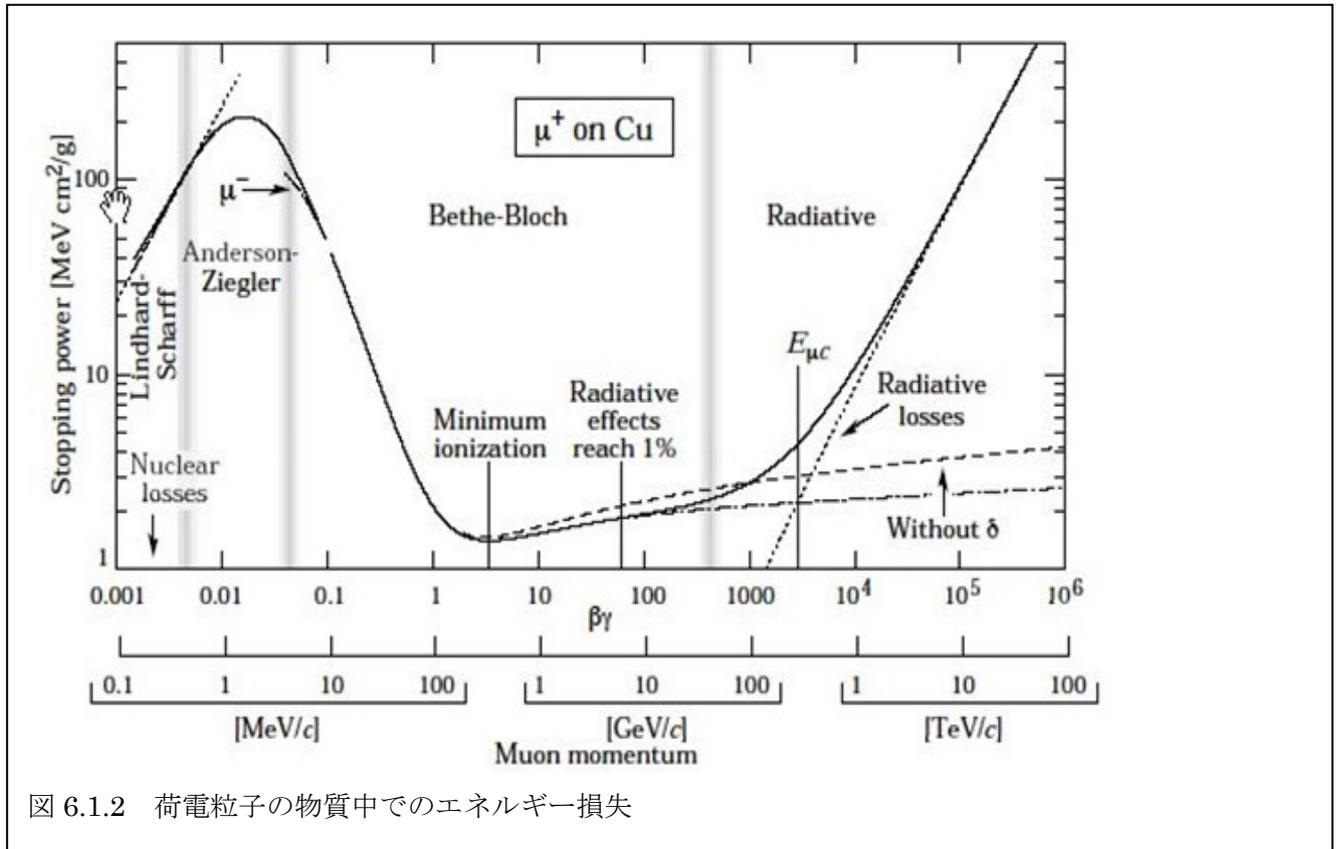


図 6.1.2 荷電粒子の物質中でのエネルギー損失

定性的な理解

- 荷電粒子は、飛跡に沿って連続的に相互作用する

$v \ll c$ の非相対論的領域では

$$\frac{dE}{dx} \propto \frac{1}{v^2} \tag{6.1.1}$$

で、速度が小さいほどエネルギー損失が大きい。

$\beta \sim 0.95$ 付近で極小値をとり、minimum ionization particle (MIP)と呼ばれ、 $dE/dx \sim 1\text{MeV/g/cm}^2$ となる

$v \sim c$ の相対論的領域では

$$\frac{dE}{dx} \propto \ln \gamma \tag{6.1.2}$$

荷電粒子の相互作用詳細

・ Bohr の式

電荷 ze の粒子が電荷 e の電子から受ける力を考え、クーロン相互作用によるエネルギー損失を考える。

$$\frac{dE}{dx} = \frac{z^2 Z e^4 N_A \rho}{2\pi\epsilon_0^2 m \cdot v^2 A} \ln \left[\frac{T_{\max}}{I} \right] \quad (6.1.3)$$

ただし、 z : 荷電粒子の原子番号 Z : 物質の原子番号 m 荷電粒子の質量 v : 荷電粒子の速度
 A : 物質の質量数

$$T_{\max} = \frac{2\beta^2 \gamma^2 m_e c^2}{1 + 2\gamma \frac{m_e}{m} + \left(\frac{m_e}{m}\right)^2} \quad (6.1.4)$$

陽子電子散乱で与えられる最大のエネルギー。

・ Bethe-Bloch の式 量子力学的に正しく導いたもの。

$$-\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] \quad (6.1.5)$$

$\beta \sim 0.95$ 付近で極小値をとり、minimum ionization と呼ばれ、 $dE/dx \sim 1\text{MeV/g/cm}^2$ となる

$$\frac{K}{A} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \quad r_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} = 2.81794[\text{fm}]$$

・ シンクロトロン輻射

荷電粒子が加速度を受けると、 γ /X 線を放出する。

$$\Delta E = \frac{4\pi}{3} \cdot \frac{e^2 \beta^3 \gamma^4}{R \cdot 4\pi\epsilon_0} = \frac{4\pi}{3} \cdot \frac{e^2 \beta^3}{4\pi\epsilon_0 \cdot R} \cdot \frac{E^4}{(mc^2)^4}$$

加速には

・ チェレンコフ放射

荷電粒子が、物質中の光速 c/n (n : 屈折率) より速く運動していると、チェレンコフ放射がおきる。

6.1.3 中性粒子と物質の相互作用

- ・ 散乱断面積

中性粒子は物質と確率的に相互作用する。

相互作用の確立を表すパラメータが「散乱断面積」。

標的となる粒子に単位面積あたり F 個の粒子が入射し (flux, 粒子測密度)、そのうちの N 個の粒子が反応を起こしたとする。この時この反応の断面積 σ の定義は以下の通り。

$$\sigma \equiv \frac{N}{F}$$

上記断面積の次元は、

$$[\sigma] = \frac{[N]}{[F]} = \frac{[1]}{[1/\text{cm}^2]} = [\text{cm}^2]$$

となり、確かに「面積」の次元を持つ。

・ X線・ガンマ線（詳細は 物理学実験Ⅱ、Ⅲ 「ガンマ線」）

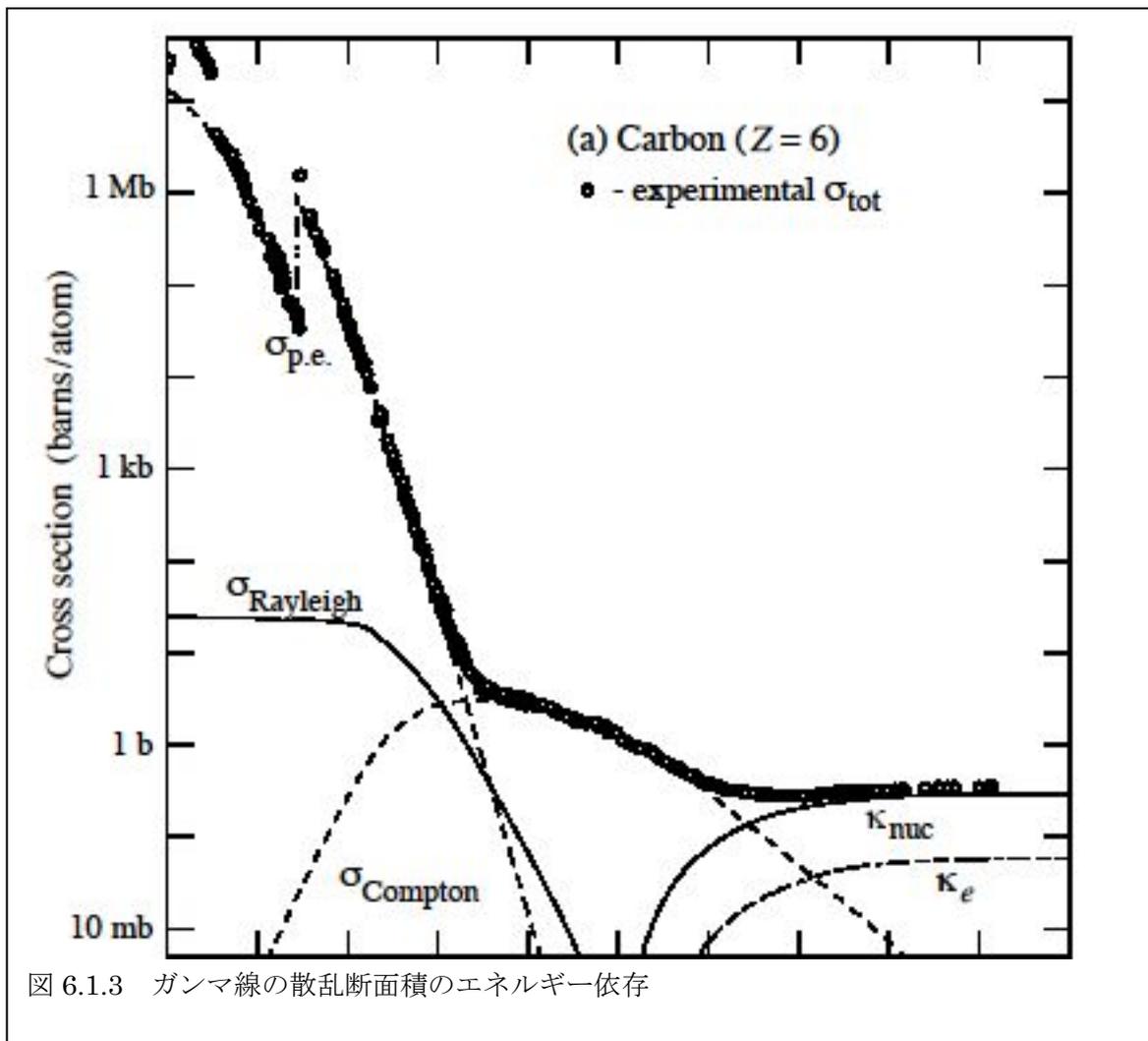
X線：原子から(1keV~100keV) ガンマ線：原子核から(10keV~数 MeV)

減衰長 (absorption length)：入射 γ 線の粒子数が、物質中で $1/e$ に減少する長さ

質量吸収計数：減衰長を密度で割ったもの。物質の状態によらない値となる。

エネルギーによって 光電効果・コンプトン散乱・対生成 を起こす

光電効果の断面積：原子番号の5乗に比例する。また、入射 γ 線のエネルギーの $7/2$ 乗に反比例する。



・ その他の中性粒子

中性子：強い相互作用 弾性散乱や中性子の吸収

ニュートリノ：弱い相互作用 電子や μ 粒子が発生

6.2 粒子検出器

6.2.1 パラメータ

粒子線検出器を表すパラメータ：大きさ、密度、検出効率、分解能 など

検出効率 粒子の検出数の入射数に対する比

分解能 検出される物理値（エネルギーや時間など）の精度。一般にガウシアンだとした時の σ

一般に $FWHM \equiv 2.35\sigma$ だけ離れたピークは見分けることが可能。

6.2.2 シンチレータ（光）

無機シンチレータ：応答は速い。大面積で速い信号を得たい TOF 測定など。

有機シンチレータ：光量が大きい。大質量可能（高エネルギーでの検出効率が良い）。

6.2.3 ガス検出器（電子）：低エネルギーでの検出効率が良い。大型化が可能。

6.2.4 半導体検出器（電離電子）：エネルギー分解能がよい。

6章に関連した例題

6-1) (6.1.8)式に物理定数を代入して、 $\alpha = \frac{1}{137}$ を示せ。また、次元解析により無次元となることを示せ。

(解答例)
$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = \frac{\mu_0 c^2 e^2}{4\pi\hbar c}$$

$\frac{\mu_0 c^2 e^2}{4\pi\hbar c}$ の次元は

6-2) (6.2.8)式、(6.2.9)式から(6.2.11)式を導け。

6-3) 運動エネルギー1MeVの電子の速度を求めよ。運動中の質量を求めよ。

(6.2.10)及び(6.2.11)式より

$$\gamma = 1 + \frac{T}{mc^2} = 1 + \frac{1000}{511} = 2.95$$

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} = 0.85$$

従って $v = 0.85 \times 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 2.55 \times 10^8 \text{ m/s}$

$$\gamma = 2.95 \text{ より } 2.95 \times 511 \text{ keV} = 1.51 \text{ MeV}$$

6-4) 運動エネルギー1MeVの中性子の速度を求めよ。

(解答例)

$$\gamma = 1 + \frac{T}{mc^2} = 1 + \frac{1}{940} = \frac{941}{940}$$

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} = \sqrt{1 - \left(\frac{940}{941}\right)^2} = 0.05$$

従って $v = 0.05 \times 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 1.5 \times 10^7 \text{ m/s}$

例題 6-5) 静止した電子と光子との散乱 (Compton 散乱) において、光子のエネルギーの変化と散乱角の関係を求めよ。反跳電子のエネルギーの取りうる範囲を考えよ。

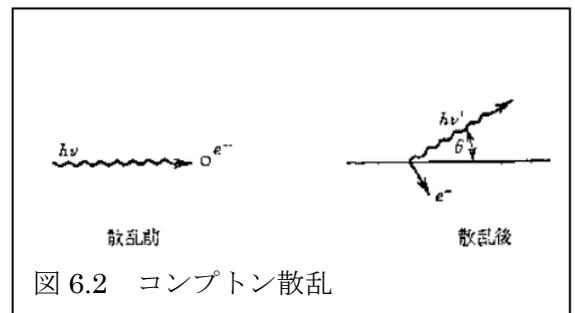
(解答例)

散乱前のガンマ線のエネルギーを E_γ 、散乱後のエネルギーを $E_{\gamma'}$ 、散乱後の電子のエネルギーを E 、運動量を P 、電子の質量を m_e 、ガンマ線の散乱角を γ 、電子の散乱角を ϕ とおく。

$$\text{エネルギー保存則から: } E_\gamma + m_e c^2 = E_{\gamma'} + E \tag{1}$$

$$\text{運動量保存から: 進行方向 } \frac{E_\gamma}{c} = \frac{E_{\gamma'}}{c} \cos\theta + P \cos\phi \tag{2}$$

$$\text{垂直方向 } 0 = \frac{E_{\gamma'}}{c} \sin\theta - P \sin\phi \tag{3}$$



ここで、相対論的關係から、 $E^2 = (Pc)^2 + (m_e c^2)^2$ である。 (4)

(1)と(4)から

$$\sqrt{(Pc)^2 + (m_e c^2)^2} = E_\gamma - E_{\gamma'} + m_e c^2 \quad (5)$$

(2)、(3)に c をかけて移項して両辺 2 乗、それぞれの和をとって ϕ を消去すると

$$(E_\gamma - E_{\gamma'} \cos\theta)^2 + E_{\gamma'}^2 \sin^2\theta = (Pc)^2 \quad (6)$$

(6)を(5)に代入、両辺を 2 乗して整理すると

$$m_e c^2 (E_\gamma - E_{\gamma'}) - E_\gamma E_{\gamma'} = -E_\gamma E_{\gamma'} \cos\theta \quad (7)$$

これより $E_{\gamma'} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_e c^2}{E_\gamma} (1 - \cos\theta)}$ =

エネルギーを MeV 単位で表すと $= \frac{E_\gamma}{1 + 1.96 E_\gamma (1 - \cos\theta)}$

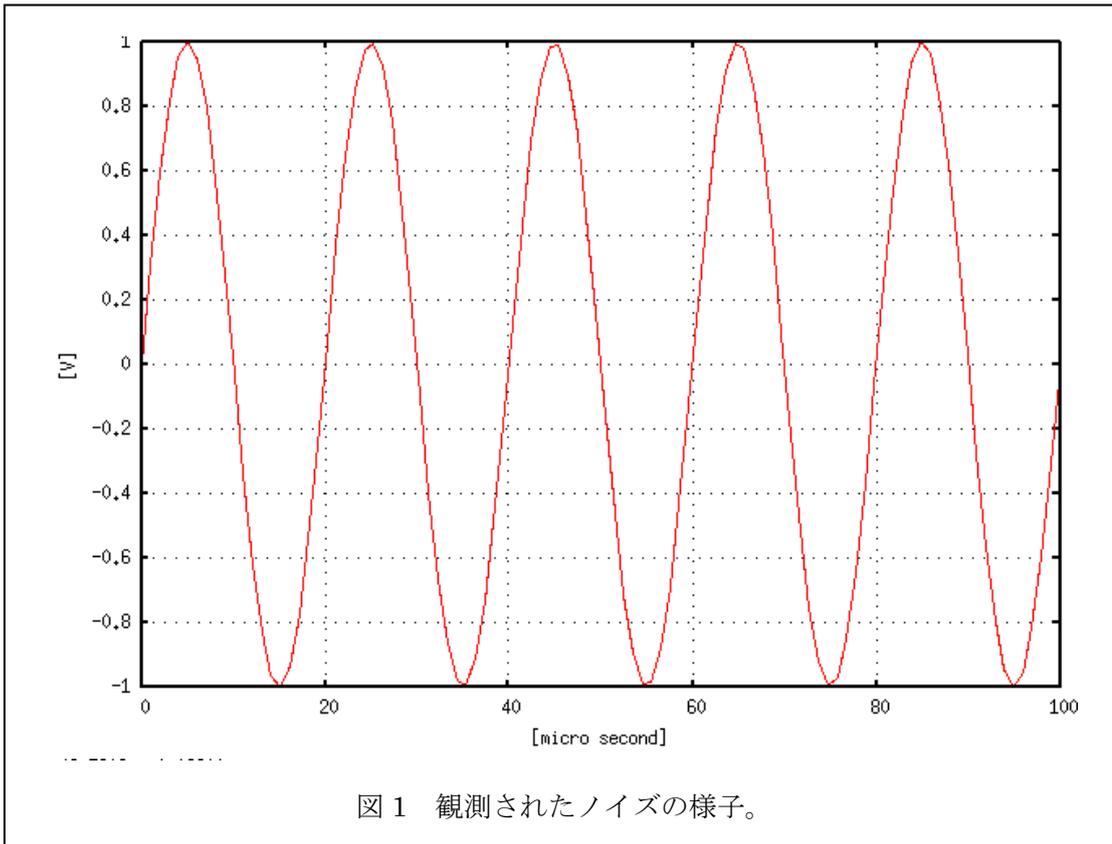
$0 < E_e < E_\gamma / (1 + 3.92 E_\gamma)$

例題 6-6) μ 粒子が最小荷電粒子の場合の速度はどれだけか。

講義ノート図 6.2 より $\beta \gamma = 2$ と読む。 $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ を代入してとくと $\gamma^2 = 5$ したがって $\beta = 0.9$

例題 6-7) 1g cm^{-3} の密度を持ち、厚さ 0.5cm の検出器を、 1MeV のエネルギーを得ると波高値 100mV で信号の継続時間が 10ns 程度の応答のある読出しと組み合わせて、最小電離粒子の測定を行いたい。装置を組みあげたところ、図 1 のようなノイズが観測された。信号がノイズの大きさの 10 倍以上になるようにするためには、どうしたらよいか考察せよ。

(解答例)



最小電離粒子のエネルギー損失を $1\text{MeV g}^{-1} \text{cm}^{-2}$ とすると、上記の検出器では、 $1 \times 1 \times 0.5 = 0.5\text{MeV}$ となる。波高値は 50mV 位が期待される。

従って、ノイズは振幅 5mV 、現状の $1/200$ 以下に減少させる必要がある。

信号の典型的な周波数 100MHz

ノイズの典型的な周波数 50kHz

ハイパスフィルターを用いて取り出すことができる。ハイパスフィルターで、カットオフ周波数 (f_c) 以下では、減衰率は周波数に比例すると考えられるので、 50kHz で $1/200$ 以下に落とすためには、 $f_c > 10\text{MHz}$ 以上のハイパスフィルターを作ればよい $2\pi f_c = \omega \sim 1/CR$ より $f_c = 1/(2\pi CR) > 10^6$ よって CR の積が 10^{-8} 以下となるような組み合わせの C と R を選択すればよい。一例として、 10pF と 50Ω

「最小電離粒子を検出したい」と言っているので、粒子を変えるという観点はNG。

○物理実験学講義に関する意見と改善案(2014 年度→2015 年度)

- * もっと具体例を。例題解説を詳しく。ノートに写す時間で例題解説をしては？ 宿題、小テストがほしい。
今年度から増えた単元に関しては例題が少なかったですね。充実してゆきます。
物理実験のための座学での講義、大学の講義は 1 コマの講義に対して 2 コマの自宅学習で成り立っているという事情を合わせて、例題を自宅学習、わからないところを講義時間や講義後に質問ということで講義を進めて行きますのでお願いします。 -.-v
- * 小テストなどで理解を確認したかったです。
例題で復習して、わからない点を次回の講義の復習の時間に質問してください。 -.-v
- * 青字を印刷すると見えません。
淡色の選択、むつかしいですね。印刷の設定も「実験」のうちということで。 -.-v
- * 物理数学基礎で統計の基礎は学習済みなので簡単でよい。
実践に活かせるよう、応用を意識して再度学習してください。 -.-v
- * 回路・自然単位系・検出器を詳しく。
回路・粒子物理関連のノート、充実してゆきます。 -.-v
- * 何かを説明するときそれが体系の中でどういう位置づけにあるかを話してほしい。
確かにそうですね。「まとめ地図」などを利用してゆきます。 -.-v
- * グラフや図、文字についての説明を詳しく。
講義ノートの注釈を加えて行きます。 -.-v
- * 扱う範囲が広すぎませんか？
この講義は後期以降の物理実験 I ~ III のための準備として、広い内容をカバーし、実験で個々のテーマに関して深く学んでもらうことが狙いとなっています。 -.-v

○物理実験学 I（統計）講義に関する意見と改善案(2013 年度→2014 年度)

- * 板書が汚い、薄い。もう少し丁寧に。(同様 3 件)
- * 講義メモがあると、油断してしまいます。
- * 例題の解説を分かりやすく。(同様 2 件)
- * 試験の様な例題を授業でも扱ってほしい。(同様 2 件)
- * ポアソン、正規分布分からなかった。もう少し具体例を。
- * 持ち込み可でも持ち込まないといけない問題はやめてほしい。
- * 文字の説明を詳しくしてほしい。
- * 数式の背景や実例などを丁寧にしてほしい。(同様 2 件)
- * 毎回宿題下さい。小テストしてください。(同様 2 件)
- * 板書と講義メモが同じなので時間がもったいない。
- * 例題を増やしてほしい。(同様 3 件)

物理実験学

- *板書に日本語の説明を。
- *確率の応用の説明を
- *講義メモに日本語の説明を増やしてほしい。
- *前回の授業の復習を。

○物理実験学 I (統計) 講義に関する意見と改善案(2012 年度→2013 年度)

- *もっと例題がほしかった。式を見るよりは実際に問題を解く方が理解しやすいと思う。
- *式だけではイメージつかみにくいので、実際の問題を。講義で例題を解いてほしい。
⇒講義中に扱える例題を増やします。講義ノートに例題を追加しておきます。

