2020 年度 大問 2

hari64boli64 (hari64boli64@gmail.com)

2025 年 4 月 23 日

1 問題

$$f(x;\mu) = \frac{1}{\mu}e^{-\frac{x}{\mu}}$$

$$Y_i = \begin{cases} a & (X_i \leq a) \\ X_i & (X_i > a) \end{cases}$$

2 解答

(1)

Y_1 の期待値は

$$\int_0^a af(x;\mu)dx + \int_a^\infty xf(x;\mu)dx = a + \mu e^{-\frac{a}{\mu}}$$

(2)

$g(\hat{\mu}) - a = \hat{\mu}e^{-\frac{a}{\hat{\mu}}}$ を考える。
存在は、連続性と $\lim_{x\to\infty} \hat{\mu}e^{-\frac{a}{\hat{\mu}}} \to \infty$ より明らか。
一意性は、微分すると狭義単調と分かるので明らか。

(3)

自信なし。
まず、$P(M = m)$ を求める。
$P(Y_1 = a) = \int_0^a f(x;\mu)dx = 1 - e^{-\frac{a}{\mu}}$ より、$P(M = m) = {}_NC_m(1 - e^{-\frac{a}{\mu}})^m(e^{-\frac{a}{\mu}})^{N-m}$

次に、$P(\overline{Y} \leq b | M = m)$ を求める。

$$
\begin{aligned}
P(\overline{Y} \leq b | M = m) &= P\left(\sum_{i=1}^{N} Y_i \leq Nb \middle| M = m\right) \\
&= P\left(am + \sum_{i=1}^{N-m} (Y_i + a) \leq Nb\right) \\
&= P\left(\sum_{i=1}^{N-m} Y_i \leq N(b-a)\right) \\
&= \int_0^{N(b-a)} f_{N-m}(y)dy \\
&= \int_a^b N f_{N-m}(N(y-a))dy
\end{aligned}
$$

ただし、一行目から二行目の変形で、指数分布の無記憶性を用いた。
また、f_{N-m} で、指数分布を $N-m$ 個重ね合わせた分布を示している。
これは、ガンマ分布に従うことが一般に知られている。(後述)
以上より、

$$
\begin{aligned}
P(M = m, \overline{Y} \leq b) &= P(M = m)P(\overline{Y} \leq b | M = m) \\
&= {}_N C_m (1 - e^{-\frac{a}{\mu}})^m (e^{-\frac{a}{\mu}})^{N-m} \int_a^b N f_{N-m}(N(y-a))dy \\
&= {}_N C_m (1 - e^{-\frac{a}{\mu}})^m (e^{-\frac{a}{\mu}})^{N-m} \int_a^b \frac{N}{(N-m-1)!\mu^{N-m}} (N(y-a))^{N-m-1} e^{-\frac{Ny-a}{\mu}} dy
\end{aligned}
$$

(4)

μ に関連する部分だけ取り出すと、

$$
M(\mu) = (1 - e^{-\frac{a}{\mu}})^m (e^{-\frac{a}{\mu}})^{N-m} \frac{1}{\mu^{N-m}} e^{-\frac{N(y-a)}{\mu}}
$$

となるが、これを微分するのは大変な困難を伴うように思われる。
なので、別の方針を考える。

$$
\begin{aligned}
h(m, y; \mu) &= \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}y}\left(\int_a^y h(m, y'; \mu)dy'\right) \\
&= \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}y}\big(P(M = m, \overline{Y} \leq y)\big) \\
&= P(M = m, \overline{Y} = y)
\end{aligned}
$$

ただし、最後の変形で、累積分布関数の微分が確率密度関数になることを用いた。

細かい議論は (2) などと同様になるので省くが、無記憶性を用いた議論や適切な変形を経ると、結局のところ、指数分布の確率密度関数 $f(x;\mu)$ について、ある値 Y を取る確率が最大になるような μ が、ただ一つ存在することを示す問題に帰着されると思われる。(厳密にはガンマ分布に対して言うべきか?)

これは、(2) の議論とほぼ同様である。

以下では、おまけ程度に、上で示した問題の解を与える。

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial\mu}f(Y;\mu) &= -\frac{1}{\mu^2}e^{-\frac{Y}{\mu}} + \frac{1}{\mu}\frac{Y}{\mu^2}e^{-\frac{Y}{\mu}} \\ &= \frac{-mu+Y}{\mu^3}e^{-\frac{Y}{\mu}}\end{aligned}$$

よって、$\frac{\partial}{\partial\mu}f(Y;\mu)=0$ となる μ は、$Y=\mu$ の時、これのみである。

以上で、大まかには題意が示された。

より詳細な議論を、本来は行うべきであろう。

3　知識

指数分布は再生性を持たない。つまり、$X_1, X_2, \cdots$ が独立に指数分布に従うとしても、$X_1+X_2+\cdots$ は指数分布に従わない。これは一般にはアーラン分布に従う。特に、今回はガンマ分布に従う。これは以下の畳み込みの式と帰納法で示せる。

$$f_{Y(=X_1+X_2)}(y) = \int_0^y f_{X_1}(x)f_{X_2}(y-x)dx$$

同じ指数分布の重ね合わせがガンマ分布になることを示す。

$$\begin{aligned}f_1(x;\mu) &= \frac{1}{\mu}e^{-\frac{x}{\mu}} \\ f_2(x;\mu) &= \int_0^x f_1(y;\mu)f_1(x-y;\mu)dy \\ &= \int_0^x \frac{1}{\mu}e^{-\frac{y}{\mu}}\frac{1}{\mu}e^{-\frac{x-y}{\mu}}dy \\ &= \frac{1}{\mu^2}\int_0^x e^{-\frac{x}{\mu}}dy \\ &= \frac{1}{\mu^2}xe^{-\frac{x}{\mu}} \\ f_3(x;\mu) &= \int_0^x f_2(y;\mu)f_1(x-y;\mu)dy \\ &= \int_0^x \frac{1}{\mu^2}ye^{-\frac{y}{\mu}}\frac{1}{\mu}e^{-\frac{x-y}{\mu}}dy\end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
&= \frac{1}{\mu^3}\int_0^x y e^{-\frac{x}{\mu}} dy \\
&= \frac{1}{2\mu^3} x^2 e^{-\frac{x}{\mu}} \\
f_n(x;\mu) &= \int_0^x f_{n-1}(y;\mu) f_1(x-y;\mu) dy \\
&= \frac{1}{(n-1)!\mu^n} x^{n-1} e^{-\frac{x}{\mu}}
\end{aligned}
$$

頑張れば、ガンマ分布の形を覚えていなくても、畳み込み計算から示すことが出来る。

指数分布の無記憶性を示す。

$$
\begin{aligned}
P(X > s+t | X > s) &= \frac{P(X > s+t)}{P(X > s)} \\
&= \frac{\int_{s+t}^{\infty} \frac{1}{\mu} e^{-\frac{x}{\mu}} dx}{\int_s^{\infty} \frac{1}{\mu} e^{-\frac{x}{\mu}} dx} \\
&= \frac{e^{-\frac{s+t}{\mu}}}{e^{-\frac{s}{\mu}}} \\
&= e^{-\frac{t}{\mu}} \\
&= P(X > t)
\end{aligned}
$$

指数分布の無記憶性とその証明

指数分布とは,「コールセンターに次に電話がかかってくるまでにかかる時間」や「電化製品が次に壊れるまでの時間」などに用いられます。「昨日コールセンターに電話がかかってきたから，今日はかかってこないだろう」とか「昨日電化製品が壊れなかったから，今日は壊れないだろう」とか，そういうことはないわけですから，この事象には，無記憶性があるといえるわけですね。

そして、最後の (4) などは、図 1 が念頭にあると、より分かりやすいと思われる。

とある x でこのグラフを切った時に、最大の値を取るような λ は、ただ一つだけというのが、この問題の視覚的な理解であると思われる。

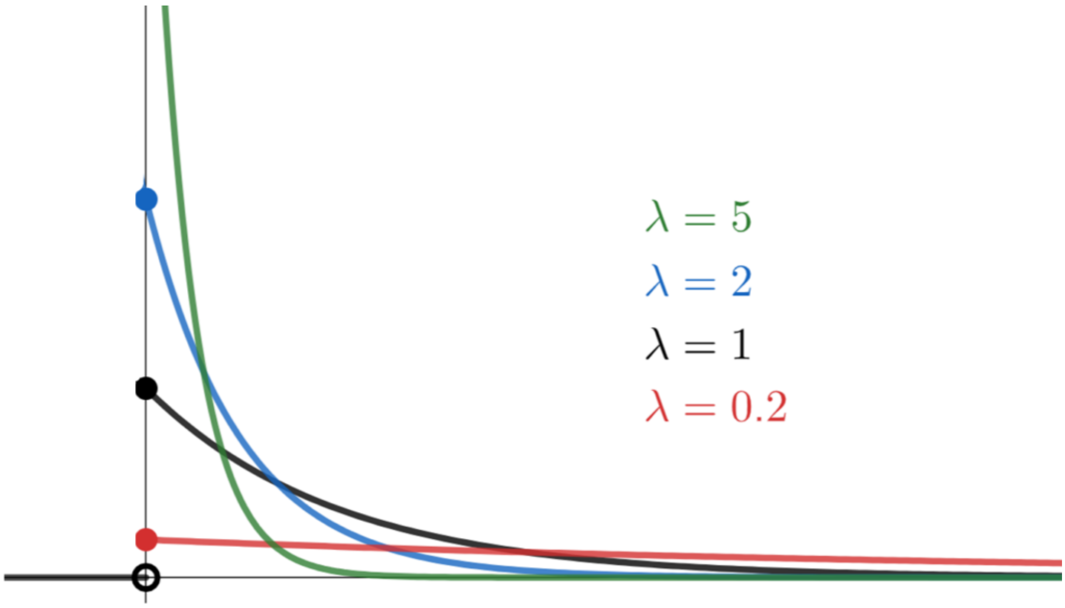

図 1　パラメータ毎の指数分布 [1]

参考文献

[1] 数学の景色."指数分布の定義と例と性質まとめ".2022 年 3 月 6 日.https://mathlandscape.com/exp-distrib/

[2] 数学の景色."指数分布の無記憶性とその証明".2021 年 9 月 23 日.https://mathlandscape.com/exp-distrib-memoryless/